



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE UNB DE PLANALTINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

WESLEY PINHEIRO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA E  
SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL**

BRASÍLIA - DF

2026



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE UNB DE PLANALTINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

WESLEY PINHEIRO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA E  
SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília (UnB) Planaltina como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais

**Orientador:** Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi

BRASÍLIA – DF

2026

WESLEY PINHEIRO DA SILVA

**MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA E  
SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL**

Banca examinadora

---

Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi  
Presidente (Universidade de Brasília)

---

Prof. Dr.  
Examinador Interno Titular (Universidade de Brasília)

---

Prof. Dr.  
Examinador Externo Titular (Universidade de Brasília)

---

Prof. Dr.  
Examinador Interno Suplente (Universidade de Brasília)

## FICHA CATALOGRÁFICA

### CIP - Catalogação na Publicação

P654mm , Wesley Pinheiro da Silva.  
MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA  
E SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL / Wesley  
Pinheiro da Silva ;

Orientador: José Vicente Elias Bernardi. Brasília, 2026.  
63 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização - Programa  
de Pós Graduação em Ciências Ambientais) Universidade de  
Brasília, 2026.

1. Mercúrio. 2. Folha. 3. Solo. 4. Serrapilheira. 5.  
Geoestatística. I. Elias Bernardi, José Vicente , orient.  
II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente à minha família, base de toda a minha trajetória. Aos colegas Ygor Sarmiento e Lucas Cabrera. Ao meu orientador, José Vicente Elias Bernardi, deixo minha sincera gratidão pela orientação e confiança ao longo de todo o processo. Agradeço ao Laboratório de Química Analítica da Universidade de Brasília – Campus Asa Norte, pelo espaço e estrutura que possibilitaram a realização das análises deste trabalho. Registro ainda meu agradecimento ao amigo Luiz Vale Santana, do Departamento de Engenharia Florestal, pela troca de conhecimentos e identificações botânicas durante o desenvolvimento do projeto. A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo meu sincero obrigado.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: DEPOSIÇÃO E MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL EM ARBÓREAS, NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL</b>	<b>16</b>
1. INTRODUÇÃO	18
2. MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1. Área de estudo	20
<i>Figura 1. Área de estudo e localização das unidades amostrais</i>	21
2.2. Coleta das amostras e identificação botânica	21
<i>Tabela 1. Identificação botânica das arbóreas</i>	22
2.3. Processamento das amostras em arbóreas	23
2.4. Determinação de mercúrio total (HgT) em arbóreas	23
2.5. Análise estatística	24
2.6.1. Krigagem ordinária (KO)	24
3. RESULTADOS	25
<i>Tabela 2. Concentração média de HgT das famílias e gêneros mais abundantes</i>	25
<i>Tabela 3. Concentração média de HgT dos gêneros mais abundantes</i>	26
<i>Figura 2. Distribuição das concentrações de mercúrio total (HgT) nas três famílias arbóreas mais abundantes (Vouchysiaceae, Fabaceae e Sapotaceae), representada por boxplots (mínimo–máximo).</i>	27
<i>Figura 3. Distribuição das concentrações de mercúrio total (HgT) nos quatro gêneros arbóreas mais abundantes (Qualea, Vochysia, Pouteria e Tachigali), representada por boxplots (mínimo–máximo).</i>	27
<i>Figura 4 (a). Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma na vegetação, krigagem ordinária</i>	29
<i>Figura 4 (b). Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma na vegetação, krigagem ordinária</i>	29
4. DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÃO	31
6. REFERÊNCIAS	32
<b>CAPÍTULO 2: DISTRIBUIÇÃO E MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA E SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL</b>	<b>38</b>
1. INTRODUÇÃO	40
2. MATERIAIS E MÉTODOS	42
2.1. Área de estudo	42
<i>Figura 1. Área de estudo e localização das unidades amostrais</i>	42
2.2. Coleta das amostras	43
2.3. Processamento das amostras em arbóreas	43
2.4. Processamento das amostras de serrapilheira	43
2.5. Processamento das amostras de solo	43
2.6. Determinação de mercúrio total (HgT) de arbóreas	44
2.7. Determinação de mercúrio total (HgT) de serrapilheira	44
2.8. Determinação de mercúrio total (HgT) do solo	44
2.9. Análises geoestatísticas	44
2.9.1. Krigagem Ordinária (KO)	44

2.9.2. CoKrigagem Ordinária (CK)	45
3. RESULTADOS	46
<i>Figura 2. Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma de solo, Krigagem ordinária</i>	47
<i>Figura 3. Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma de serrapilheira, Krigagem ordinária</i>	48
<i>Figura 4. Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma da vegetação, Krigagem ordinária</i>	49
<i>Figura 5. Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma, CoKrigagem ordinária</i>	50
4. DISCUSSÃO	50
<i>Tabela 1. Concentrações de HgT (<math>\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}</math>) em solos de diferentes biomas e países</i>	
<i>Tabela 2. Concentrações médias de HgT em folhas em estudos realizados em diferentes biomas e países</i>	51
5. CONCLUSÃO	52
6. REFERÊNCIAS	53
REGISTROS FOTOGRÁFICOS	58

## **RESUMO GERAL**

O mercúrio (Hg) é um poluente persistente, tóxico e globalmente distribuído, cuja dinâmica ambiental é controlada por interações entre a atmosfera, a vegetação e os solos, tornando os ecossistemas terrestres componentes-chave de seu ciclo biogeoquímico. Nas florestas e savanas tropicais, a vegetação atua como uma importante via de remoção do Hg atmosférico por absorção foliar, transferindo-o posteriormente ao solo por meio da serrapilheira; contudo, a estabilidade desse sequestro pode ser reduzida por processos pós-depositacionais e por perturbações frequentes, como o fogo e as mudanças no uso da terra. Apesar da relevância global do bioma Cerrado — caracterizado por alta diversidade de espécies, forte sazonalidade climática e regimes recorrentes de queimadas — ainda são escassos estudos integrados que avaliem simultaneamente o Hg em folhas, serrapilheira e solos, bem como a variabilidade interespecífica e espacial desse contaminante em áreas protegidas. Diante dessa lacuna, esta dissertação investiga a distribuição e o mapeamento do mercúrio total em compartimentos vegetais, solo e serrapilheira do Cerrado sensu stricto, buscando compreender os mecanismos naturais que controlam o papel da vegetação tropical na regulação do Hg e a vulnerabilidade desses reservatórios frente a perturbações ambientais. A dissertação está estruturada em dois capítulos. O Capítulo 1 aborda a deposição e o acúmulo de HgT em folhas de espécies arbóreas do Cerrado sensu stricto, com ênfase na variabilidade entre famílias e gêneros botânicos e na distribuição espacial das concentrações dentro da unidade de conservação. O Capítulo 2 apresenta uma abordagem integrada da distribuição espacial do HgT nos compartimentos solo, serrapilheira e vegetação arbórea, utilizando técnicas de geoestatística univariada e multivariada.

## **APRESENTAÇÃO GERAL**

O mercúrio (Hg) é um poluente persistente, tóxico e distribuído globalmente, cujo comportamento ambiental é regido por trocas acopladas entre a atmosfera, os ecossistemas terrestres e os sistemas aquáticos. Como o transporte atmosférico permite a dispersão de longo alcance, o Hg emitido por fontes naturais e antropogênicas pode ser depositado longe de sua origem, tornando os sumidouros terrestres regulares-chave da distribuição global do Hg e do risco de exposição humana/ ecossistêmica (Driscoll et. al., 2013; Stamenkovic & Gustin, 2009). Nas últimas décadas, as florestas têm sido cada vez mais reconhecidas como

componentes centrais do ciclo do Hg, funcionando não apenas como sumidouros e reservatórios, mas também como fontes episódicas sob perturbações (por exemplo, incêndios), com implicações importantes para a eficácia das políticas de controle do Hg (Driscoll et. al., 2013; Stamenkovic & Gustin, 2009).

Um grande avanço na biogeoquímica do Hg é o reconhecimento de que a vegetação florestal remove ativamente o mercúrio elementar gasoso ( $Hg^0$ ) da atmosfera por meio da absorção direta pelas folhas. Várias linhas de evidência indicam que o  $Hg^0$  pode entrar nas folhas principalmente através dos estômatos durante a troca gasosa, enquanto vias não estomáticas (por exemplo, processos cuticulares) também podem contribuir, dependendo das condições e das espécies (Zhou et. al., 2021; Risch et. al., 2017). Sínteses e avaliações globais agora consideram a absorção pela vegetação entre as vias dominantes de transferência do Hg atmosférico para a terra, muitas vezes comparável ou superior à deposição úmida em regiões florestadas (Millhollen et. al., 2006; Rish et. al., 2017; Grigal et. al., 2003). Após a absorção, o Hg é fortemente retido nos tecidos vegetais por meio da associação com matéria orgânica, particularmente grupos funcionais de enxofre reduzido, contribuindo para a fixação biológica eficaz ao longo da vida útil das folhas (Bishop et. al., 2020 & Yuan et. al., 2023). Esse sumidouro fisiológico vincula os padrões de deposição de Hg à produtividade da vegetação, fenologia e controles climáticos sobre a condutância estomática e a troca do dossel (Millhollen et. al., 2006; Rish et. al., 2017; Zhou et. al., 2018).

Uma vez incorporado à folhagem, o Hg é transportado para o solo da floresta principalmente por meio da queda de folhas, criando uma ponte mecânica entre a absorção atmosférica e o armazenamento no solo. O fluxo de Hg da queda de folhas é, portanto, amplamente utilizado como um intermediador integrativo para a deposição de Hg mediada pela vegetação, refletindo a exposição atmosférica, a estrutura do dossel, a absorção específica da espécie e a longevidade das folhas (Grigal et. al., 2003 & Wright et. al., 2016). Redes de observação e estudos regionais demonstram que a queda de folhas pode representar uma grande fração da carga total de Hg nos solos florestais e fornece uma estimativa operacional do “limite inferior” da transferência de Hg por deposição seca em muitas florestas (Grigal et. al., 2003 & Wright et. al., 2016). No entanto, a transferência das folhas para o solo é mediada pela decomposição, lixiviação e processamento microbiano dentro da serapilheira e dos horizontes orgânicos, de modo que a magnitude e o momento da incorporação no solo podem variar substancialmente (Yuan et. al., 2023; Wright et. al., 2016; Smith-Downey et. al., 2010).

Os solos florestais são o maior reservatório terrestre de Hg, armazenando mais Hg globalmente do que a vegetação e a atmosfera combinadas, com fortes controles exercidos pela estabilização e renovação da matéria orgânica do solo (Yuan et. al., 2023; Obrist et. al., 2018; Fostier et. al., 2015). O Hg do solo é frequentemente correlacionado com o carbono orgânico, consistente com a alta afinidade do Hg por locais de ligação orgânicos e o papel central dos horizontes orgânicos na regulação do transporte vertical e retenção de longo prazo (Bishop et. al., 2020; Yuan et. al., 2023; Fostier et. al., 2015). Conseqüentemente, as relações entre o Hg nas folhas vivas, na camada de detritos/folhagem e nos solos não são necessariamente lineares. Mesmo onde a absorção foliar é forte, os processos pós-deposicionais — decomposição da matéria orgânica, associação mineral, condições redox, atividade microbiana e reemissão gasosa — podem desacoplar esses compartimentos, produzindo reservatórios de Hg no solo espacialmente heterogêneos (Yuan et. al., 2023; Smith-Downey et. al., 2010; Fostier et. al., 2015).

Essas ligações permanecem especialmente incertas em ecossistemas tropicais, apesar de sua importância global. As florestas tropicais apresentam alta produtividade primária, forte troca de copa, rápida decomposição de detritos e intenso ciclo hidrológico, condições que podem alterar a retenção de Hg em relação às florestas temperadas/boreais (Millhollen et. al., 2006; Yuan et. al., 2023; Smith-Downey et. al., 2010). Estudos empíricos do Brasil mostram que a queda de detritos pode constituir uma transferência substancial de Hg para os solos na Amazônia e na Mata Atlântica, ressaltando a provável importância da deposição de Hg mediada pela vegetação em regiões tropicais (Teixeira et. al., 2012 & Pleijel et. al., 2021). No entanto, estudos integrados que quantificam simultaneamente o Hg em folhas vivas, camadas de detritos e solos, ao mesmo tempo em que resolvem a variabilidade em nível de espécie, permanecem limitados em número em comparação com latitudes mais altas (Millhollen et. al., 2006; Smith-Downey et. al., 2010; Teixeira et. al., 2012; Pleijel et. al., 2021). Essa lacuna é crítica porque as florestas tropicais podem armazenar grandes reservatórios de Hg, ao mesmo tempo em que estão sujeitas a pressões e perturbações aceleradas do uso da terra. Estudos recentes no Cerrado brasileiro demonstram que a intensificação do uso da terra e as características geológicas regionais controlam fortemente a mobilização e o acúmulo de elementos potencialmente tóxicos, evidenciando a sensibilidade dos ecossistemas naturais às pressões antrópicas mesmo em áreas aparentemente preservadas (Monteiro et. al., 2025).

A diversidade de espécies e a variação de características funcionais introduzem um controle adicional e potencialmente dominante sobre a fixação de Hg nas florestas tropicais. O acúmulo de Hg foliar varia entre as espécies devido a diferenças no comportamento estomático, vida útil das folhas, área foliar específica, posição do dossel e características da superfície, com muitos estudos mostrando influências claras da idade das folhas e diferenças funcionais das plantas nos padrões de acúmulo de Hg (Millhollen et. al., 2006; Rish et. al., 2017; Silva-Filho et. al. 2006; Michelazzo et. al., 2010). Sistemas ricos em espécies, como a Amazônia e a Mata Atlântica, podem, portanto, apresentar variabilidade pronunciada dentro do local em Hg foliar, e mudanças na composição das espécies associadas a perturbações ou sucessão podem alterar a absorção de Hg em escala de ecossistema e a transferência de Hg pela queda de folhas (Millhollen et. al., 2006; Yuan et. al., 2023; Smith-Downey et. al., 2010). Nesse contexto, avaliar a covariância entre Hg foliar, Hg da serapilheira e Hg do solo entre as espécies fornece uma rota direta para testar se as diferenças impulsionadas pela diversidade na fixação de Hg na copa se traduzem em diferenças no armazenamento de Hg no solo.

O fogo representa um importante mecanismo pelo qual o Hg armazenado pode ser rapidamente devolvido à atmosfera, transformando as florestas de sumidouros em fontes episódicas. O Hg acumulado na biomassa acima do solo, na serapilheira/horizontes orgânicos e nos solos superficiais pode volatilizar-se durante a queima da biomassa, produzindo emissões atmosféricas de curto prazo que podem compensar anos ou décadas de acumulação de Hg no ecossistema (Webster et. al., 2016; Pivello et. al., 2011). Trabalhos na Amazônia sul quantificaram diretamente as cargas de Hg na vegetação/detritos e as perdas de Hg durante incêndios florestais controlados, demonstrando emissões substanciais de Hg associadas à queima da biomassa acima do solo e dos horizontes orgânicos (Webster et. al., 2016). De forma mais ampla, estudos sobre incêndios florestais mostram que os reservatórios de Hg no solo podem ser alterados pela combustão e que a erosão e a mobilização pós-incêndio podem redistribuir ainda mais o Hg dentro das bacias hidrográficas (Burke et. al., 2010 & Pivello et. al., 2011). Esses processos são particularmente relevantes para o Brasil, onde as mudanças no uso da terra e o aumento das interações entre secas e incêndios elevam a atividade de incêndios e a intensidade das perturbações.

O Cerrado é amplamente descrito como um bioma dependente do fogo ou moldado pelo fogo, com fortes regimes sazonais de incêndios e influência antropogênica substancial nos padrões de ignição, tornando o fogo um fator ecológico

persistente na região (Schmidt et. al., 2018). A remobilização impulsionada pelo fogo representa, portanto, uma razão plausível para a redução da estabilidade do sequestro de Hg em savanas tropicais altamente sazonais em relação às florestas tropicais sempre-verdes, especialmente onde queimadas repetidas afetam o desenvolvimento do horizonte orgânico e o acúmulo de detritos (Burke et. al., 2010). A vegetação do Cerrado atua simultaneamente como reservatório temporário e fonte secundária de Hg, uma vez que o mercúrio assimilado pelas folhas é majoritariamente transferido ao solo via serrapilheira e pode ser remobilizado por distúrbios como o fogo (Pedrosa et. al., 2026). Assim, em ambientes savânicos sujeitos a queimadas recorrentes, o fogo tende a volatilizar o Hg acumulado na biomassa e nos horizontes superficiais do solo, enfraquecendo o sequestro de longo prazo e reforçando o papel do Cerrado como fonte atmosférica regional de mercúrio.

Em conjunto, os processos interligados de absorção foliar de Hg, transferência de detritos, armazenamento no solo e reemissão impulsionada pelo fogo posicionam as florestas tropicais como reguladores dinâmicos da biogeoquímica do Hg, em vez de sumidouros estáticos. Estudos integrados que quantificam as concentrações de Hg em folhas, serapilheira (fresca e em decomposição) e solos em várias espécies e biomas são essenciais para restringir a estabilidade do sequestro de Hg, a sensibilidade dos reservatórios de Hg às perturbações e o papel dos ecossistemas tropicais nos orçamentos e modelos regionais e globais de Hg (Millhollen et. al., 2006; Yuan et. al., 2023; Smith-Downey et. al., 2010; Teixeira et. al., 2012; Pleijel et. al., 2021; Webster et. al., 2016).

Neste estudo, integramos medições das concentrações de Hg em folhas vivas, serapilheira e solos em locais representativos do Cerrado e ecossistemas para avaliar o papel da vegetação tropical na regulação da biogeoquímica do Hg. Os objetivos são: quantificar e mapear a deposição de mercúrio total (HgT) em espécies arbóreas do bioma Cerrado sensu stricto, em uma unidade de conservação no Brasil, a fim de compreender a distribuição espacial desse contaminante e evidenciar as famílias e gêneros com maiores concentrações nas folhas da vegetação (**Capítulo 1**). Assim, foi estabelecido as seguintes hipóteses para o desenvolvimento deste estudo: (i) determinadas famílias e gêneros arbóreos apresentam maior capacidade de acumulação de HgT, em decorrência de características fisiológicas e anatômicas próprias de cada grupo taxonômico; (ii) as concentrações de HgT exibem variação espacial ao longo da unidade de conservação, originando padrões de distribuição passíveis de identificação por técnicas de interpolação espacial; e (iii) a quantificação de HgT nas espécies arbóreas será inferior em áreas com baixa proximidade de

emissões antrópicas diretas. Avaliar a distribuição espacial e as inter-relações do mercúrio total (HgT) nos compartimentos solo, serrapilheira e folhas de arbóreas em áreas de Cerrado sensu stricto em uma unidade de conservação, por meio de técnicas de geoestatística univariada e multivariada, a fim de compreender os padrões de acumulação do Hg em ecossistemas naturais (**Capítulo 2**). Assim, foi estabelecido as seguintes hipóteses para o desenvolvimento deste estudo: (i) As concentrações de HgT nos compartimentos solo, serrapilheira e vegetação arbórea refletem predominantemente processos naturais de deposição atmosférica e ciclagem biogeoquímica; e (ii) A serrapilheira atua como um compartimento intermediário chave na ciclagem do mercúrio, apresentando padrões espaciais e concentrações de HgT mais próximas às da vegetação do que às do solo, em função da deposição atmosférica seca e da transferência do Hg da biomassa vegetal.

### **Referências**

Bishop, K.; et al. (2020) Recent advances in understanding and measurement of mercury in the environment: Terrestrial Hg cycling. *Sci. Total Environ.* 721, 137647.

Burke, M.P.; et al. (2010) The Effect of Wildfire on Soil Mercury Concentrations in Southern California Watersheds. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 2431–2437.

De Britto Pedrosa, R.F.C., Monteiro, L.C., Rodrigues, Y.O.S. et al. (2026). Spatial Distribution of Mercury in Vegetation and Soil in a Conservation Unit Near Highways. *Water Air Soil Pollut* 237, 110. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08797-z>

Driscoll, C.T.; Mason, R.P.; Chan, H.M.; Jacob, D.J.; Pirrone, N. (2013) Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environ. Sci. Technol.* 47, 4967–4983.

Feinberg, A.; et al. (2022) Evaluating atmospheric mercury (Hg) uptake by vegetation in biogeochemical models. *Environ. Sci.: Processes Impacts*.

Fostier, A.H.; Melendez-Perez, J.J.; Richter, L. (2015) Litter mercury deposition in the Amazonian rainforest. *Environ. Pollut.* 206, 605–610.

Grigal, D.F. (2003). Mercury sequestration in forests and peatlands: A review. *J. Environ. Qual.* 32, 393–405.

Michelazzo, P.A.M.; et al. (2010) Mercury emissions from forest burning in southern Amazon. *Geophys. Res. Lett.* 37, L09809.

Millhollen, A.G.; Gustin, M.S.; Obrist, D. (2006). Foliar Mercury Accumulation and Exchange for Three Tree Species. *Environ. Sci. Technol.* 40, 6001–6006.

Monteiro, L.C., Vieira, L.C.G., Bernardi, J.V.E. et al. (2025). Combined effects of land use and geology on potentially toxic elements contamination in lacustrine sediments from the Araguaia River floodplain, Brazilian Savanna. *Environ Monit Assess* 197, 683. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14118-y>

Obrist, D.; et al. (2018) A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use. *Ambio*, 47, 116–140.

Pivello, V.R. (2011) The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecology*.

Pleijel, H.; et al. (2021) Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area. *Biogeosciences*, 18, 6313–6328.

Risch, M.R.; et al. (2017) Atmospheric mercury deposition to forests in the eastern USA. *Environ. Pollut.* 229, 447–457.

Schmidt, I.B.; et al. (2018) Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. *J. Appl. Ecol.*

Silva-Filho, E.V.; et al. (2006) Mercury deposition through litterfall in an Atlantic Forest (Ilha Grande, SE Brazil). *Chemosphere*, 65, 2477–2484.

Smith-Downey, N.V.; Sunderland, E.M.; Jacob, D.J. (2010). Anthropogenic impacts on global storage and emissions of mercury from terrestrial soils: Insights from a new global model. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 115, G03008.

Stamenkovic, J.; Gustin, M.S. (2009). Nonstomatal versus Stomatal Uptake of Atmospheric Mercury. *Environ. Sci. Technol.* 43, 1367–1372.

Teixeira, D.C.; et al. (2012) Litterfall mercury deposition in Atlantic forest ecosystem from SE Brazil. *Environ. Pollut.*

Webster, J.P.; et al. (2016) Estimating mercury emissions resulting from wildfire in forests of the Western United States. *Sci. Total Environ.* 568, 95–102.

Wright, L.P.; et al. (2016) Overview of mercury dry deposition, litterfall, and throughfall in forests (review/synthesis). *Atmos. Chem. Phys.*

Yuan, T.; et al. (2023) Buffering effect of global vegetation on the air–land exchange of atmospheric elemental mercury. *Environ. Sci. Technol.*

Zhou, J.; et al. (2018) Deposition and fate of mercury in litterfall, litter, and soil in forest ecosystems. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 123, 2595–2610.

Zhou, J.; Obrist, D.; Dastoor, A.; Jiskra, M.; Ryjkov, A. (2021). Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 269–284.

## **CAPÍTULO 1: MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL EM ARBÓREAS, NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL**

### **RESUMO**

O mercúrio (Hg) é um contaminante atmosférico persistente cuja emissão global foi intensificada por atividades antropogênicas, representando riscos ambientais e à saúde humana. No Brasil, embora a maioria das pesquisas sobre Hg concentre-se na Amazônia, o Cerrado permanece pouco investigado. Este estudo quantificou e mapeou a deposição de mercúrio total (HgT) em espécies arbóreas do Cerrado sensu stricto no Parque Estadual Terra Ronca (PETeR), visando compreender padrões espaciais e diferenças entre famílias e gêneros vegetais. Foram coletadas utilizando o método de ponto quadrante 60 amostras foliares em 15 pontos distribuídos pela unidade de conservação e analisadas por espectrometria de absorção atômica Zeeman (RA-915+). As análises estatísticas revelaram diferenças significativas entre famílias, com destaque para Vochysiaceae (22,84 ng·g<sup>-1</sup>), que apresentou as maiores concentrações médias de HgT. Entre os gêneros mais abundantes, não houve diferenças estatisticamente significativas. A krigagem ordinária permitiu identificar gradientes espaciais associados à proximidade de pressões antrópicas, como áreas agrícolas e vias de tráfego. As concentrações registradas no PETeR foram substancialmente inferiores às relatadas em regiões com fontes diretas de emissão. Os resultados reforçam a relevância da vegetação do Cerrado como sumidouro atmosférico de Hg e evidenciam lacunas de pesquisa no bioma, contribuindo para o avanço do conhecimento para estabelecer valores de referência para a região e subsidiar futuras comparações no bioma Cerrado.

**Palavras-chave:** *Mercúrio Total, Vegetação, Cerrado, Krigagem Ordinária*

## ABSTRACT

Mercury (Hg) is a persistent atmospheric contaminant whose global emissions have been intensified by anthropogenic activities, posing environmental and human health risks. In Brazil, although most research on Hg is concentrated in the Amazon, the Cerrado remains understudied. This study quantified and mapped the deposition of total mercury (HgT) in arboreal species of the Cerrado sensu stricto within the Terra Ronca State Park (PETeR), aiming to understand spatial patterns and differences among plant families and genera. A total of 60 leaf samples were collected using the point-centered quarter method at 15 sites distributed across the conservation unit and analyzed by Zeeman atomic absorption spectrometry (RA-915+). Statistical analyses revealed significant differences among families, with Vochysiaceae ( $22.84 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) showing the highest mean concentrations of HgT. Among the most abundant genera, no statistically significant differences were observed. Ordinary kriging allowed the identification of spatial gradients associated with proximity to anthropogenic pressures, such as agricultural areas and traffic routes. The concentrations recorded in PETeR were substantially lower than those reported in regions with direct emission sources. The results reinforce the relevance of Cerrado vegetation as an atmospheric sink for Hg and highlight research gaps within the biome, contributing to the advancement of knowledge for establishing reference values for the region and supporting future comparisons in the Cerrado biome.

**Keywords:** *Total Mercury, Vegetation, Cerrado, Ordinary Kriging*

## 1. INTRODUÇÃO

O mercúrio elementar gasoso ( $\text{Hg}^0$ ) é a forma dominante na atmosfera e é transportado por longas distâncias sendo depositado em ecossistemas terrestres (Xu et. al., 2025; Lindberg et. al., 2007). As ações humanas elevaram as concentrações ambientais de mercúrio (Hg) em escala global, especialmente após o processo de industrialização, com destaque para a queima de combustíveis fósseis (Pirrone et. al., 2010). De modo geral, as emissões globais totais de mercúrio (Hg) para a atmosfera situam-se entre 6500 e 8200 Mg por ano. Desse total, aproximadamente 4600 a 5300 Mg por ano são provenientes de processos e fontes naturais, que incluem emissões geogênicas primárias e emissões secundárias. As fontes antropogênicas primárias contribuem com cerca de 1900 a 2900 Mg por ano, enquanto os aportes naturais primários de origem geogênica variam entre 80 e 600 Mg por ano (Driscoll et. al., 2013).

A deposição atmosférica de mercúrio aumentou cerca de três vezes desde o período pré-industrial (1850). Tal aumento e a exposição ao Hg podem causar sérios danos à saúde humana, ao sistema nervoso, digestivo, imunológico, pulmonar, renal, ocular, além de ser considerada uma das substâncias químicas de maior preocupação na saúde pública (Kim et. al., 2016). A Convenção de Minamata, estabelecida pelas Nações Unidas, passou a vigorar em agosto de 2017 com o objetivo central de reduzir as emissões antropogênicas de mercúrio, visando à proteção do meio ambiente e à proteção da saúde humana (Bank, 2020). Desse modo, diferentes tipos de investigações, informações científicas e ecossistemas, são fundamentais para entender a cadeia causal, com implicações importantes para os governantes ao formularem e avaliarem políticas no contexto da Convenção de Minamata das Nações Unidas (H. Selin et. al., 2018).

O ambiente terrestre desempenha um papel fundamental no ciclo global do mercúrio, recebendo uma grande parcela do Hg que retorna da atmosfera emitido por fontes antrópicas e naturais (Outridge et. al., 2018). Um avanço significativo na compreensão da biogeoquímica do Hg reside no reconhecimento de que a vegetação florestal promove a remoção ativa do  $\text{Hg}^0$  da atmosfera, principalmente por meio de sua absorção direta pelas superfícies foliares. Várias evidências sugerem que o  $\text{Hg}^0$  ingressa nas folhas predominantemente por meio dos estômatos durante os processos de troca gasosa, embora vias não estomáticas, como a absorção via cutícula, também possam contribuir de forma relevante, a depender das condições ambientais e das características das espécies (Zhou et. al., 2021; Risch et. al., 2017). Após sua incorporação aos tecidos foliares, o Hg é transferido para o solo principalmente por

meio da queda de folhas, estabelecendo uma conexão mecânica entre a absorção atmosférica e o acúmulo nos solos naturais (Pokharel & Obrist, 2011). A partir desses reservatórios terrestres, o mercúrio pode ser mobilizado e transportado para os ecossistemas aquáticos por meio do escoamento superficial e da drenagem fluvial das bacias hidrográficas, frequentemente associado à matéria orgânica dissolvida e aos sedimentos em suspensão, que atuam como vetores no transporte do Hg na coluna d'água e integram seu ciclo biogeoquímico nos ambientes aquáticos (Brigham et. al., 2009).

Nas últimas décadas, as florestas passaram a ser amplamente reconhecidas como elementos-chave no ciclo biogeoquímico do Hg, atuando não apenas como sumidouros e compartimentos de armazenamento, mas também como fontes temporárias em resposta a distúrbios ambientais, como incêndios florestais, o que acarreta implicações relevantes para a efetividade das políticas de controle e mitigação do Hg (Driscoll et. al., 2013; Stamenkovic & Gustin, 2009). O Cerrado é amplamente caracterizado como um bioma dependente ou moldado pela ação do fogo, apresentando regimes sazonais intensos de incêndios e significativa influência antrópica nos padrões de ignição, o que torna o fogo um elemento ecológico recorrente e determinante na dinâmica desse ecossistema (Schmidt et al., 2018). A vegetação do Cerrado atua simultaneamente como reservatório temporário e fonte secundária de Hg, uma vez que o mercúrio assimilado pelas folhas é majoritariamente transferido ao solo via serrapilheira e pode ser remobilizado por distúrbios como o fogo (Pedrosa et. al., 2026). Assim, em ambientes savânicos sujeitos a queimadas recorrentes, o fogo tende a volatilizar o Hg acumulado na biomassa e nos horizontes superficiais do solo, enfraquecendo o sequestro de longo prazo e reforçando o papel do Cerrado como fonte atmosférica regional de mercúrio.

As tecnologias de sensoriamento remoto oferecem, atualmente, oportunidades para a caracterização dos fatores ambientais que controlam o ciclo do Hg em amplas escalas espaciais. Abordagens geoestatísticas, como a Krigagem Ordinária (KO) constitui uma ferramenta robusta para a modelagem de padrões espaciais e para a identificação de áreas com maior concentração de HgT (Rodrigues et. al., 2025). Diante disso, são escassos os estudos integrados que quantificam de forma concomitante as concentrações de Hg em folhas vivas, camadas de serapilheira e solos, incorporando, simultaneamente, a variabilidade em nível de espécie, especialmente quando comparados àqueles conduzidos em latitudes mais elevadas (Millhollen et al., 2006; Smith-Downey et al., 2010; Teixeira et al., 2012; Pleijel et al., 2021). Essa lacuna de conhecimento é particularmente relevante, uma vez que as

florestas tropicais podem constituir importantes reservatórios de Hg e, ao mesmo tempo, encontram-se submetidas a intensas pressões e perturbações associadas à mudança no uso da terra. Evidências recentes provenientes do Cerrado brasileiro indicam que a intensificação do uso da terra, aliada às características geológicas regionais, exerce forte controle sobre a mobilização e o acúmulo de elementos potencialmente tóxicos, revelando a elevada sensibilidade de ecossistemas naturais às pressões antrópicas, mesmo em áreas consideradas relativamente preservadas (Monteiro et al., 2025).

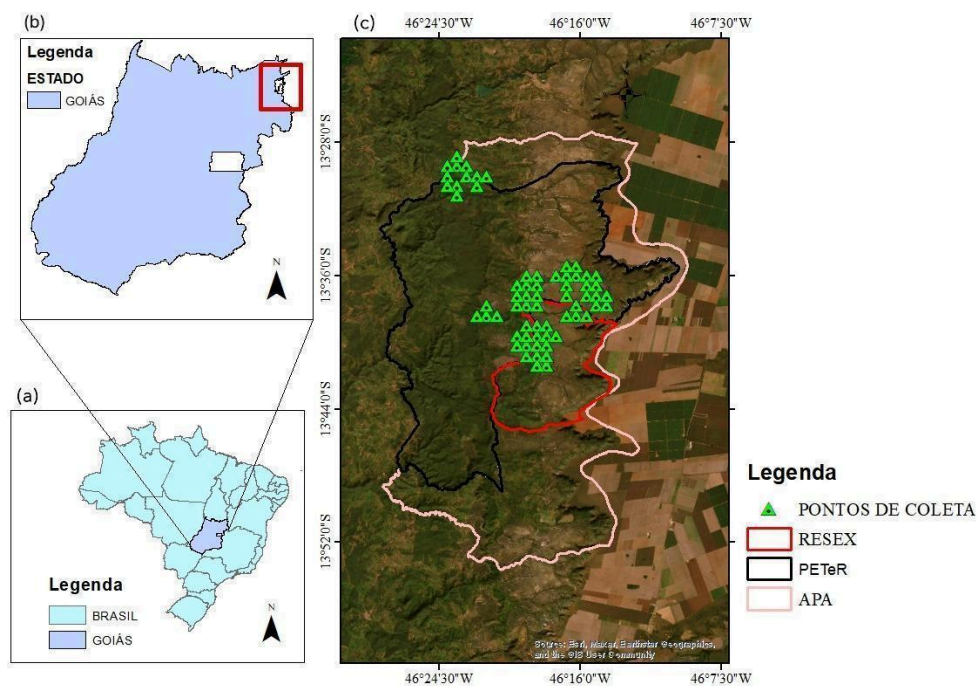
Neste estudo, integramos medições das concentrações de Hg em folhas vivas em locais representativos do Cerrado para avaliar o papel da vegetação tropical na regulação da biogeoquímica do Hg com o objetivo de quantificar e mapear a deposição de mercúrio total (HgT) em espécies arbóreas do bioma Cerrado sensu stricto, em uma unidade de conservação no Brasil, a fim de compreender a distribuição espacial desse contaminante e evidenciar as famílias e gêneros com maiores concentrações nas folhas da vegetação. Assim, foi estabelecido as seguintes hipóteses para o desenvolvimento deste estudo: (i) determinadas famílias e gêneros arbóreos apresentam maior capacidade de acumulação de HgT, em decorrência de características fisiológicas e anatômicas próprias de cada grupo taxonômico; (ii) as concentrações de HgT exibem variação espacial ao longo da unidade de conservação, originando padrões de distribuição passíveis de identificação por técnicas de interpolação espacial; e (iii) a quantificação de HgT nas espécies arbóreas será inferior em áreas com baixa proximidade de emissões antrópicas diretas.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Área de estudo**

O Parque Estadual Terra Ronca (PETeR), a Reserva Extrativista Recanto das Araras (RESEX) e a Área de Proteção Ambiental Serra Geral de Goiás (APA Serra Geral) estão localizados em Goiás nos municípios de São Domingos e Guarani de Goiás, importantes áreas de conservação no Brasil. O Parque detém uma área de 57 mil hectares e destaca-se pela abundância de cavernas e rios subterrâneos sendo um dos maiores complexos espeleológicos do país (Governo de Goiás, 2017). O PETeR apresenta as coordenadas geográficas: Norte 13°29'03" S e 46°23'06" Wgr.; Sul 13°48'53" S e 46°20'45" Wgr.; Leste 13°35'29" S e 46°10'00" Wgr., Oeste 13°33'04" S e 46°28'01" Wgr e se encontra dentro da Área de Proteção Ambiental da Serra Geral (APA).

O PETeR, a RESEX e a APA Serra Geral contribuem para a preservação de uma grande área de vegetação de Cerrado, em sua maior parte por Cerrado sensu stricto. O clima da região, segundo o sistema de classificação do Köppen, é do tipo tropical (Aw) com duas estações bem definidas: inverno seco (de abril a setembro) e verão úmido (de outubro a março) (Alvares et al., 2013).



**Figura 1.** Área de estudo e localização das unidades amostrais

## 2.2. Coleta das amostras e identificação botânica

Foram coletadas em 15 pontos espalhados pelo PETeR durante o período de inverno seco, nos dias 27, 28, 29 e 30 de junho de 2023 utilizando o método do ponto quadrante (Cottam e Curtis, 1956). As unidades amostrais foram determinadas por áreas de bioma de Cerrado sensu stricto. Uma trena foi esticada partindo do ponto central em quatro direções até alcançar o indivíduo de vegetação arbórea nativa viva mais próximo, cortando amostras juntos ao pecíolo utilizando uma tesoura de poda, guardadas em sacos de papel para conter a transpiração. As amostras de folhas vivas totalizaram 60 amostras. Além das amostras coletadas para a quantificação de mercúrio total (HgT), também foram obtidas amostras vegetais em prensas botânicas, destinadas à identificação taxonômica das espécies. O material coletado foi devidamente encaminhado ao Herbário da Universidade de Brasília (UnB), onde foram realizados os procedimentos de comparação e identificação botânica.

Foram identificadas amostras das famílias Anacardiaceae, Bignoniaceae, Connaraceae, Dilleniaceae, Fabaceae, Loganiaceae, Malpighiaceae, Melastomataceae, Metteniusaceae, Rhamnaceae, Rubiaceae, Sapindaceae, Sapotaceae e Vochysiaceae (Tabela 1) e dos gêneros Alibertia, Antonia, Astronium, Bowdichia, Byrsonima, Calisthene, Connarus, Cordiera, Davilla, Dilodendron, Emmotum, Handroanthus, Mouriri, Platymenia, Pouteria, Qualea, Rhamnidium, Rudgea, Tachigali, Vatairea e Vochysia (Tabela 1).

**Tabela 1.** Identificação botânica das arbóreas

<b>Indivíduos</b>	<b>Família</b>	<b>Gênero</b>
1	Anacardiaceae	Astronium (1)
1	Bignoniaceae	Handroanthus (1)
2	Connaraceae	Connarus (2)
2	Dilleniaceae	Davilla (2)
12	Fabaceae	Tachigali (7), Vatairea (2), Platymenia (1), Bowdichia (2)
1	Malpighiaceae	Byrsonima (1)
1	Loganiaceae	Antonia (1)
1	Melastomataceae	Mouriri (1)
1	Metteniusaceae	Emmotum (1)
1	Rhamnaceae	Rhamnidium (1)
4	Rubiaceae	Cordiera (2), Rudgea (1), Alibertia (1)
1	Sapindaceae	Dilodendron (1)
13	Sapotaceae	Pouteria (13)

19	Vochysiaceae	Vochysia (8), Qualea (10), Callisthene (1)
----	--------------	--------------------------------------------------

### **2.3. *Processamento das amostras em arbóreas***

O processamento aconteceu a partir da secagem das amostras em uma câmara climática modelo MA 1403/ 450UR a 60°C por cerca de 48 horas. Posteriormente, foram trituradas em um triturador e armazenadas em microtubos de plástico, à temperatura ambiente (Kelly et. al 2012).

### **2.4. *Determinação de mercúrio total (HgT) em arbóreas***

Foi utilizado o equipamento de espectrometria de absorção atômica de Zeeman RA-915+ e PYRO-915 – Lumex Módulo 2, com uma temperatura variando entre 520-580°C para determinar as concentrações de HgT. Inicialmente, a amostra sólida é introduzida em um forno de pirólise, onde é submetida a aquecimento controlado, promovendo a decomposição térmica da matriz e a liberação do mercúrio presente no material. O vapor de mercúrio gerado é então transportado por um fluxo de ar para a célula analítica do equipamento, onde ocorre a detecção por espectrometria de absorção atômica no comprimento de onda de 254 nm, utilizando correção de fundo por efeito Zeeman para eliminar interferências da matriz (Lumex Instruments, 2026).

O resultado dos dados foi assegurado por meio da análise em triplicatas e duplicatas com o coeficiente de variação apresentando entre 0 e 10%. Foi empregado amostras de referência certificada de folhas de maçã (NIST-1515) para avaliar a acurácia do método analítico, com taxa de recuperação média entre 80 e 110%, e amostras em branco.

### **2.5. *Análise estatística***

No presente estudo, os dados de concentração de HgT das três famílias mais abundantes atenderam aos pressupostos de normalidade. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk ( $n < 50$ ). Em função desse resultado, empregou-se o teste paramétrico de Ordinary one-way ANOVA para a comparação entre as concentrações de HgT das

famílias de vegetação, o qual indicou diferenças estatisticamente significativas conforme evidenciado pelo valor de  $p < 0,05$ . Posteriormente, realizou-se o teste Tukey's multiple comparisons test, com o objetivo de identificar quais pares de famílias apresentaram diferenças significativas entre as concentrações de HgT. No que se refere à análise dos dados de concentração de HgT dos quatro gêneros de vegetação mais abundantes, não atenderam aos pressupostos de normalidade. Foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk ( $n < 50$ ). Com base nesse resultado, utilizou-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis, o qual não indicou diferenças estatisticamente significativas conforme evidenciado pelo valor de  $p < 0,05$  para comparar as concentrações de HgT entre os gêneros de vegetação. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software Prism, versão 8.0.1.

## **2.6. Análises geoestatísticas**

### **2.6.1. Krigagem ordinária (KO)**

Para a análise exploratória de dados, a autocorrelação entre a quantidade de Hg a fim de identificar possíveis padrões espaciais foi aplicado a Krigagem ordinária (KO). Método geoestatístico com base na amostragem, realizando o processo de inferência espacial denominado interpolação de dados. É um método de estimativa e, dessa forma, um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima (Yamamoto e Landim, 2013).

A krigagem ordinária assume que a variável de interesse, pode ser modelada como um processo estocástico, cuja estrutura espacial pode ser descrita por um variograma. O variograma mede a dependência espacial entre as amostras para prever valores em locais não amostrados (Mukesh et al., 2020).

O estimador da Krigagem ordinária é expresso como:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

$Z_{KO}^*(x_0)$ : valor estimado pelo método da Krigagem Ordinária no ponto de localização;

$Z(X_i)$ : valor observado da variável regionalizada no ponto amostral  $x_i$ ;

$\lambda_i$ : peso atribuído ao valor observado  $Z(x_i)$ , determinado pelo sistema de equações da krigagem.

n: número total de pontos amostrais utilizados na estimativa.

$x_0$ : ponto onde se deseja estimar o valor da variável.

$x_i$ : posição espacial dos pontos amostrais utilizados na krigagem.

A elaboração dos mapas e as análises geoestatísticas foram realizadas no software *ArcMap versão 10.08*, desenvolvido pela Esri (Environmental Systems Research Institute). O processamento, organização e representação espacial dos dados foram conduzidos no ambiente do software, permitindo a análise integrada das informações espaciais. Para a realização das análises geoestatísticas foi utilizada a extensão *Geostatistical Analyst*, por meio da ferramenta *Geostatistical Wizard*.

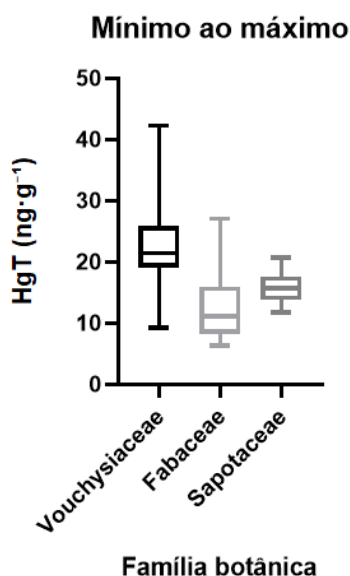
### 3. RESULTADOS

#### ***Análises de concentração de HgT entre famílias e gêneros de arbóreas***

As análises das concentrações de mercúrio total (HgT) entre as três famílias de vegetação mais abundantes (Tabela 2) indicaram diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,05$ ), conforme verificado pelo teste ANOVA e pelo pós-teste de Tukey. Observou-se que a família *Vochysiaceae* apresentou as maiores concentrações médias de HgT, enquanto *Fabaceae* e *Sapotaceae* exibiram valores inferiores (Figura 2). A variação da concentração de mercúrio total (HgT) entre as famílias botânicas *Vochysiaceae*, *Fabaceae* e *Sapotaceae* é apresentada no boxplot da Figura 2. Observa-se que a família *Vochysiaceae* apresentou as maiores medianas e maior amplitude de variação nas concentrações de HgT, enquanto *Fabaceae* e *Sapotaceae* exibiram valores medianos inferiores e menor dispersão dos dados.

**Tabela 2.** Concentração média de HgT das famílias e gêneros mais abundantes

<b>Família</b>	<b>Concentração média de HgT (ng·g<sup>-1</sup>)</b>
Fabaceae	13.0135
Sapotaceae	15.9378
Vochysiaceae	22.8387



**Figura 2.** Distribuição das concentrações de HgT nas três famílias arbóreas mais abundantes (Vochysiaceae, Fabaceae e Sapotaceae), representada por boxplots (mínimo–máximo).

No boxplot, a linha interna indica a mediana; a caixa representa o intervalo interquartil; e os bigodes estendem-se do valor mínimo ao máximo observado. A figura evidencia que a família Vochysiaceae apresentou mediana de HgT mais elevada e maior amplitude de variação em relação às demais famílias. Após a verificação de diferenças entre os grupos por meio da análise de variância (ANOVA), foi aplicado o pós-teste LSD de Fisher (não corrigido) para identificar quais famílias apresentavam diferenças significativas entre si. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas envolvendo a família Vochysiaceae (Tabela 3).

**Tabela 3.** Comparações múltiplas entre famílias vegetais pelo teste LSD de Fisher

Teste LSD de Fisher não corrigido	Diferença a média	IC de 95,00% da diferença	Significativo	Resultado	Valor de p individual	
Vochysiaceae vs. Fabaceae	9,825	4,456 to 15,19	Yes	***	0,0006	A - B
Vochysiaceae vs. Sapotaceae	6,901	1,810 to 11,99	Yes	**	0,0091	A - C

Fabaceae vs. Sapotaceae	-2,924	-8,834 to 2,986	No	ns	0,3237	B - C
----------------------------	--------	-----------------	----	----	--------	-------------

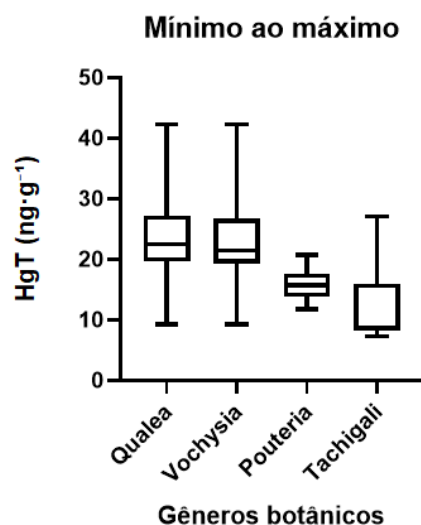
A comparação entre Vochysiaceae e Fabaceae apresentou diferença média de 9,825, com intervalo de confiança de 95% entre 4,456 e 15,19, indicando diferença significativa ( $p = 0,0006$ ). De forma semelhante, a comparação entre Vochysiaceae e Sapotaceae também revelou diferença estatisticamente significativa, com diferença média de 6,901 e intervalo de confiança de 95% variando entre 1,810 e 11,99 ( $p = 0,0091$ ). Por outro lado, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre Fabaceae e Sapotaceae, uma vez que a diferença média foi de  $-2,924$ , com intervalo de confiança de 95% entre  $-8,834$  e  $2,986$ , abrangendo o valor zero ( $p = 0,3237$ ). De modo geral, esses resultados indicam que a família Vochysiaceae apresentou valores significativamente diferentes em relação às famílias Fabaceae e Sapotaceae, enquanto Fabaceae e Sapotaceae não diferiram estatisticamente entre si para a variável analisada.

Por outro lado, a análise das concentrações de HgT entre os quatro gêneros de vegetação mais abundantes (Tabela 4) não revelou diferenças estatisticamente significativas ( $p > 0,05$ ), conforme indicado pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, aplicado em função da não normalidade dos dados. Observa-se uma tendência de maiores concentrações médias de HgT nos gêneros Qualea e Vochysia, em comparação aos gêneros Pouteria e Tachigali (Figura 3), apesar da ausência de significância estatística.

**Tabela 4.** Concentração média de HgT dos gêneros mais abundantes

Gêneros	Concentração média de HgT ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )
Qualea	23.9305
Vochysia	23.5168
Pouteria	15.9378

Tachigali	12.9859
-----------	---------



**Figura 3.** Distribuição das concentrações de mercúrio total (HgT) nos quatro gêneros arbóreos mais abundantes (Qualea, Vochysia, Pouteria e Tachigali), representada por boxplots (mínimo–máximo).

A linha central de cada boxplot indica a mediana, as caixas correspondem ao intervalo interquartil e os bigodes representam os valores mínimo e máximo observados. As comparações múltiplas entre os gêneros foram realizadas utilizando o teste de Dunn com valores de  $p$  ajustados. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas entre alguns dos gêneros analisados (Tabela 5).

**Tabela 5.** Comparações pareadas entre gêneros utilizando o teste de Dunn com valores de  $p$  ajustados.

Teste de comparações múltiplas de Dunn	Diferença média dos postos	Signific ativo?	Resu mo	Valor de $p$ ajustado	
Qualea vs. Vochysia	1,278	Não	ns	>0,9999	A-B
Qualea vs. Pouteria	17,65	Sim	*	0,0176	A-C
Qualea vs. Tachigali	22,38	Sim	*	0,0124	A-D

Vochysia vs. Pouteria	16,37	Sim	*	0,0348	B-C
Vochysia vs. Tachigali	21,1	Sim	*	0,022	B-D
Pouteria vs. Tachigali	4,725	Não	ns	>0,9999	C-D

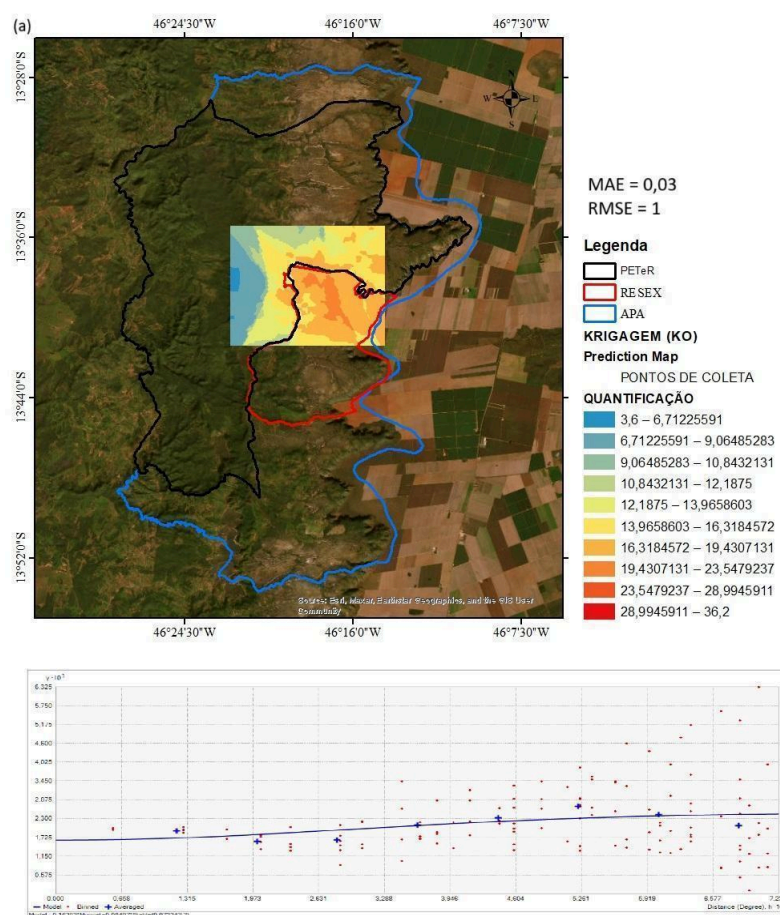
Não foi observada diferença significativa entre *Qualea* e *Vochysia* ( $p > 0,9999$ ), bem como entre *Pouteria* e *Tachigali* ( $p > 0,9999$ ). Por outro lado, foram identificadas diferenças significativas entre *Qualea* e *Pouteria* (diferença média de ranks = 17,65;  $p = 0,0176$ ) e entre *Qualea* e *Tachigali* (diferença média de ranks = 22,38;  $p = 0,0124$ ). Além disso, *Vochysia* apresentou diferenças significativas em relação aos gêneros *Pouteria* (diferença média de ranks = 16,37;  $p = 0,0348$ ) e *Tachigali* (diferença média de ranks = 21,1;  $p = 0,022$ ). De modo geral, os resultados indicam que *Pouteria* e *Tachigali* apresentaram comportamento estatisticamente semelhante entre si, enquanto *Qualea* e *Vochysia* também não diferiram significativamente entre si, mas diferiram dos dois primeiros gêneros analisados.

### ***KriGagem ordinária (KO)***

Devido à grande extensão territorial da unidade de conservação e à complexidade logística para alcançar determinados pontos de difícil acesso, tornou-se necessário adotar um procedimento de recorte espacial para a realização da KO. Utilizando as 60 amostras coletadas na área de estudo para a geração da superfície interpolada, o recorte espacial delimitado pelos pontos amostrais localizados na porção superior ao norte do parque e pelos pontos situados na porção inferior, na região mais sudeste do mapa, definindo assim a área de abrangência da interpolação.

A distribuição dos pontos de coleta no parque apresenta uma heterogeneidade marcante, tanto em densidade espacial quanto em acessibilidade. Essa condição

influenciou diretamente a qualidade da interpolação e justificou a divisão dos dados em dois conjuntos distintos: Figura 4 e Figura 5. A KO foi aplicada com o objetivo de interpolar os valores de concentração de HgT ao longo da área de estudo (Figura 4 e Figura 5), permitindo a geração de um mapa contínuo de predição espacial. O desempenho estatístico do modelo foi avaliado por meio dos erros de predição e da regressão entre valores medidos e preditos. A KO demonstrou-se adequada para a identificação dos padrões espaciais gerais da concentração de HgT. O modelo apresentou Root Mean Square Error (RMSE) de aproximadamente 01 e um Mean Absolute Error (MAE) de 0,03 e 0,16. Os erros médios absolutos se mantiveram baixos, sugerindo boa estabilidade do ajuste local. O modelo atendeu ao propósito de identificar zonas de maior e menor concentração, sendo apropriado para subsidiar as análises ambientais.



**Figura 4 (a).** Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma na vegetação, krigagem ordinária



anatômicas entre as seções do gênero, enquanto as *Vochysias*, mesmo dentro de uma mesma subseção, observam-se uma grande diversidade nas características anatômicas das folhas (Sajo M. G. & Rudall P. J., 2001).

No que se refere ao mecanismo de acúmulo de Hg na folhagem, diversas evidências indicam que os estômatos desempenham papel central no controle do fluxo de absorção de Hg (0) (Wohlgemuth L. et al., 2022). Estudos anatômicos mostram que espécies de Vochysiaceae, como *Qualea parviflora*, apresentam estômatos relativamente grandes e com variações estruturais associadas às condições ambientais em que ocorrem (Ariano A. P. R. & Silva I. V., 2016). Uma vez no interior da folha, o mercúrio elementar ( $Hg^0$ ) é oxidado a mercúrio divalente [ $Hg(II)$ ], tornando-se menos volátil e mais quimicamente reativo. O  $Hg(II)$  liga-se prontamente a grupos sulfidríla ( $-SH$ ) de compostos ricos em enxofre, formando complexos estáveis que favorecem a retenção do mercúrio nos tecidos foliares (Liu et al., 2022).

A comparação entre Vochysiaceae e Fabaceae apresentou diferença média de 9,825 com intervalo de confiança de 4,456 a 15,19 e  $p = 0,0006$ , uma tendência de que espécies da família Vochysiaceae acumularam significativamente mais Hg atmosférico que Fabaceae. Folhas mais espessas e com maior massa foliar por área podem apresentar maior capacidade de retenção interna de contaminantes após a absorção estomática, aumentando o acúmulo de Hg ao longo do tempo (Filartiga et al., 2022). Esse resultado pode estar relacionado às características morfológicas típicas das folhas de muitas espécies de Vochysiaceae, que frequentemente apresentam limbo mais espesso, cutícula desenvolvida e maior resistência estrutural, características que favorecem a retenção de partículas atmosféricas e compostos metálicos na superfície foliar (Filartiga et al., 2022).

A comparação entre Fabaceae e Sapotaceae não apresentou diferença significativa ( $p = 0,3237$ ), com intervalo de confiança que inclui zero ( $-8,834$  a  $2,986$ ), indicando que essas duas famílias apresentam padrões semelhantes de acumulação de mercúrio atmosférico. É possível inferir que pela convergência de estratégias morfológicas e fisiológicas relacionadas às folhas as espécies de Fabaceae frequentemente apresentam folhas compostas ou folíolos menores, que aumentam a área de contato com a atmosfera, favorecendo a deposição de partículas atmosféricas (Oliveira & Isaias, 2008). Por sua vez, Sapotaceae apresenta folhas mais espessas e duráveis, que permanecem mais tempo expostas à atmosfera, permitindo maior deposição ao longo do tempo. Contudo, a taxa de absorção estomática pode ser menor, resultando em níveis de Hg semelhantes aos observados em Fabaceae

(Teixeira et al., 2018). A ausência de diferença significativa entre *Qualea* e *Vochysia* é possível ser explicada pela proximidade taxonômica entre esses gêneros, ambos pertencentes à família Vochysiaceae, o que implica forte similaridade em características morfológicas das folhas.

As concentrações médias de HgT encontradas nas espécies avaliadas no PETeR quando são comparadas com os valores reportados na literatura, observa-se que os níveis registrados são muito inferiores aos encontrados em regiões com tráfego rodoviário intenso, como os  $1.945 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  observados na Polônia (Samecka-Cymerman & Kempers, 1999),  $48,70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  relatados na China (Pan et al., 2023),  $80,00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  também reportados em área rodoviária chinesa (Li et al., 2007). De forma ainda mais expressiva, concentrações extremamente elevadas, como  $23.000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  registrados na República Tcheca (Soudek et al., 2012), reforçam o contraste entre ambientes impactados e a área estudada. Da mesma forma, estudos realizados em outros biomas brasileiros como em espécies da Amazônia foi identificado níveis médios de  $46,00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (Michelazzo et al., 2010) e  $73,00 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  na Mata Atlântica, níveis acima das médias encontradas no PETeR (De França et al. 2004). O valor médio de  $34,37 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  de Hg encontrado no Brasil (Pedrosa et al., 2026) representa a integração espacial e ecológica dos processos de deposição e retenção de origem antrópica. Embora este estudo não quantifique diretamente as emissões provenientes da queima, áreas próximas a rodovias, que apresentam maiores concentrações de Hg, tornam-se potenciais hotspots de emissão durante eventos de fogo. Esse processo reforça o papel da vegetação como um reservatório temporário de Hg e do fogo como um elo crítico na sua reintrodução ao ciclo atmosférico.

Embora o presente estudo não tenha considerado variáveis morfológicas das folhas, sugere-se que futuras pesquisas avaliem a influência da idade foliar e da área foliar específica (AFE) sobre as concentrações de Hg (Hakan, Pleijel et. al., 2021). Esses parâmetros podem fornecer uma compreensão mais detalhada da capacidade de acúmulo de mercúrio pela copa das árvores, visto que a idade das folhas e a AFE são fatores relacionados à absorção e retenção de elementos traços na vegetação (Bushey et al., 2008).

Os valores de erro (MAE = 0,03–0,16) e RMSE = 1 indicam um desempenho satisfatório do modelo geoestatístico, com precisão adequada para representar a variabilidade espacial do mercúrio total nas áreas amostradas (Hodson, 2022). Os mapas gerados revelam que as maiores concentrações de HgT tendem a se localizar próximas às zonas de maior pressão antrópica, especialmente nos limites do parque,

onde se observam atividades agrícolas e presença de vias utilizadas por veículos. Esse comportamento pode ser explicado pela maior mobilização de partículas e pela deposição atmosférica decorrente dessas atividades (Rodrigues et. al., 2022). Por outro lado, as áreas mais centrais do PETeR, afastadas das pressões externas, apresentaram concentrações significativamente menores. Esse padrão espacial demonstra que, embora o PETeR atue como área de proteção, sua borda está vulnerável à influência de atividades humanas.

## 5. CONCLUSÃO

A diferença significativa observada entre as famílias, mas não entre os gêneros, sugere que o acúmulo de HgT está mais relacionado a características fisiológicas e anatômicas comuns em nível taxonômico superior. Assim, variações intra-familiares entre gêneros podem não ser suficientes para gerar distinções estatísticas na bioacumulação de mercúrio. As médias obtidas para as famílias Fabaceae, Sapotaceae e Vochysiaceae, assim como para os gêneros Qualea, Vochysia, Pouteria e Tachigali, enquadram-se em uma faixa típica de áreas não expostas a fontes antrópicas intensas. De maneira mais ampla, é possível inferir que os resultados obtidos reforçam a importância da vegetação como um sumidouro natural de mercúrio, desempenhando papel fundamental na retenção e ciclagem desse metal em ecossistemas terrestres. A capacidade das folhas de interceptar deposições atmosféricas — tanto na forma particulada quanto gasosa — contribui para a remoção do Hg da atmosfera e para sua incorporação na matéria orgânica da serrapilheira, onde continuará participando das dinâmicas biogeoquímicas locais. Nesse sentido, este estudo evidencia que, mesmo em ambientes preservados, a vegetação funciona como componente-chave nos fluxos de Hg no ambiente. Ademais, esses dados primários são importantes para estabelecer valores de referência para a região e subsidiar futuras comparações no bioma Cerrado. O estudo do mercúrio em ambientes como o Cerrado *sensu stricto* é de grande importância ambiental, uma vez que esse bioma tem sido intensamente impactado por atividades antrópicas, especialmente pelo aumento da recorrência de incêndios. O mercúrio atmosférico pode ser depositado ao longo do tempo sobre a vegetação e os solos, atuando nesses compartimentos como importantes reservatórios temporários do elemento. No entanto, os eventos de fogo promovem a volatilização do mercúrio previamente acumulado, favorecendo sua reemissão para a atmosfera e reintegração ao ciclo biogeoquímico global. Esse processo transforma o Cerrado não apenas em um sumidouro, mas

também em uma fonte secundária de mercúrio, intensificando sua dispersão regional e global e representando riscos potenciais aos ecossistemas e à saúde humana. Dessa forma, o monitoramento e a compreensão da dinâmica do mercúrio nesse bioma são essenciais para avaliar os efeitos das mudanças no uso da terra e do aumento da frequência de incêndios sobre o ciclo ambiental de contaminantes traços.

## 6. REFERÊNCIAS

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Ana Paula Ramos Ariano, Ivone Vieira da Silva (2016). Leaf anatomy of *Qualea parviflora* (Vochysiaceae) in three phytophysiognomies of the Mato Grosso State, Brazil. *Botany - Acta Amaz.* 46 (2) - Apr-Jun 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201504173>

Arinawa Liz Filartiga, Adam Klimeš, Jan Altman, Michael Peter Nobis, Alan Crivellaro, Fritz Schweingruber, Jiří Doležal (2022). Comparative anatomy of leaf petioles in temperate trees and shrubs: the role of plant size, environment and phylogeny, *Annals of Botany*, Volume 129, Issue 5, 11 April 2022, Pages 567–582, <https://doi.org/10.1093/aob/mcac014>

Aryeh Feinberg, Thandolwethu Dlamini, Martin Jiskra, Viral Shah and Noelle E. Selin (2022). Evaluating atmospheric mercury (Hg) uptake by vegetation in a chemistry-transport model. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 2022,24, 1303-1318

Bank MS. (2020). The mercury science-policy interface: History, evolution and progress of the Minamata Convention. *Sci Total Environ.* Jun 20;722:137832. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137832.

Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The Use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. *Ecology*, 37(3), 451–460. <https://doi.org/10.2307/1930167>

Daniel C. Teixeira, Luiz D. Lacerda, Emmanoel V. Silva-Filho (2018). Foliar mercury content from tropical trees and its correlation with physiological parameters in situ, *Environmental Pollution*, Volume 242, Part B, 2018, Pages 1050-1057, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.120>.

de Britto Pedrosa, R.F.C., Monteiro, L.C., Rodrigues, Y.O.S. et al. (2026). Spatial Distribution of Mercury in Vegetation and Soil in a Conservation Unit Near Highways. *Water Air Soil Pollut* 237, 110. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08797-z>

De França, E. J., De Nadai Fernandes, E. A., Bacchi, M. A., & Saiki, M. (2004). Native trees as biomonitors of chemical elements in the biodiversity conservation of the

Atlantic Forest. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 49, 579–592.  
<https://doi.org/10.1007/s10874-004-1267-y>

De Freitas F, Solera K, Lopes VJS, Córdova MO, Cavalheiro L, Moreno MIC, Battirola LD, de Andrade RLT (2024). Native accumulator plants with a differential mercury phytoremediation potential in a region in Southern Amazon. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024 Nov;31(54):63120-63135. doi: 10.1007/s11356-024-35407-y. Epub 2024 Oct 30. PMID: 39472373

Driscoll, C.T.; Mason, R.P.; Chan, H.M.; Jacob, D.J.; Pirrone, N. (2013) Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environ. Sci. Technol.* 47, 4967–4983.

Governo de Goiás (2017). [Goiasturismo.go.gov.br](https://www.goiasturismo.go.gov.br).  
<https://www.goiasturismo.go.gov.br/pt/atracoes/sao-domingos/natureza/parque-estadua-l-de-terra-ronca>

Håkan Pleijel, Jenny Klingberg, Michelle Nerentorp, Malin C. Broberg, Brigitte Nyirambangutse, John Munthe, and Göran Wallin (2021). Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area. *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-18-6313-2021>

Henrik Selin, Susan Egan Keane, Shuxiao Wang, Noelle E. Selin, Kenneth Davis & Dominique Bally (2018) . Linking science and policy to support the implementation of the Minamata Convention on Mercury. *Ambio* 47, 198–215.  
<https://doi.org/10.1007/s13280-017-1003-x>

Hodson O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geosci. Model Dev.*, 15, 5481–5487,  
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

Joseph T. Bushey, Alexei G. Nallana, Mario R. Montesdeoca, Charles T. Driscoll, (2008). Mercury dynamics of a northern hardwood canopy. *Atmospheric Environment*. Volume 42, Issue 29, September 2008, Pages 6905-6914.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.043>

Kim KH, Kabir E, Jahan SA. (2016). A review on the distribution of Hg in the environment and its human health impacts. *J Hazard Mater*. Apr 5;306:376-385. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.11.031.

Kelly, J.G., Han, F.X., Su, Y. *et al.* (2012). Rapid Determination of Mercury in Contaminated Soil and Plant Samples Using Portable Mercury Direct Analyzer without Sample Preparation, a Comparative Study. *Water Air Soil Pollut* 223, 2361–2371.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-1030-3>

Landim P. M. B. & Yamamoto J. K. (2013). *Geoestatística. Conceitos e Aplicações*. 215 páginas, 1ª edição. ISBN-10 : 8579750776. ISBN-13 : 978-8579750779

Lena Wohlgemuth, Pasi Rautio, Bernd Ahrends, Alexander Russ, Lars Vesterdal, Peter Waldner, Volkmar Timmermann, Nadine Eickenscheidt, Alfred Fürst, Martin Greve, Peter Roskams, Anne Thimonier, Manuel Nicolas, Anna Kowalska, Morten Ingerslev, Päivi Merilä, Sue Benham, Carmen Iacoban, Günter Hoch, Christine Alewell, and Martin Jiskra (2022). Physiological and climate controls on foliar mercury uptake by European tree species. *Biogeosciences*. Volume 19, issue 5 BG, 19, 1335–1353, 2022. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1335-2022>

Li, F. R., Kang, L. F., Gao, X. Q., Hua, W., Yang, F. W., & Hei, W. L. (2007). Traffic-related heavy metal accumulation in soils and plants in Northwest China. *Soil & Sediment Contamination*, 16(5), 473–484. <https://doi.org/10.1080/15320380701490168>

Liu, Y., Liu, G., Wang, Z., Guo, Y., Yin, Y., Zhang, X., Jiang, G. (2022). Understanding foliar accumulation of atmospheric Hg in terrestrial vegetation: Progress and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(24), 4331–4352. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1989235>

LUMEX INSTRUMENTS. RA-915M mercury analyzer with PYRO-915+ thermal decomposition attachment. Disponível em: <https://www.lumexinstruments.com/catalog/atomic-absorption-spectrometry/ra-915m-pyro-915.php>. Acesso em: 11 mar. 2026.

Mark E. Brigham, Dennis A. Wentz, George R. Aiken, and David P. Krabbenhoft (2009). Mercury Cycling in Stream Ecosystems. 1. Water Column Chemistry and Transport. *Environmental Science & Technology* 2009 43 (8), 2720-2725 DOI:10.1021/es802694n

Michelazzo, P. A. M., Fostier, A. H., Magarelli, G., Santos, J. C., & de Carvalho, J. A., Jr. (2010). Mercury emissions from forest burning in southern Amazon. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2009GL042220>

Millhollen, A.G.; Gustin, M.S.; Obrist, D. (2006). Foliar Mercury Accumulation and Exchange for Three Tree Species. *Environ. Sci. Technol.* 40, 6001–6006.

Monteiro, L.C., Vieira, L.C.G., Bernardi, J.V.E. et al. (2025). Combined effects of land use and geology on potentially toxic elements contamination in lacustrine sediments from the Araguaia River floodplain, Brazilian Savanna. *Environ Monit Assess* 197, 683. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14118-y>

Moraes Pinto, Lilian de C., José G. Dórea, José Vicente Elias Bernardi, and Leonardo Fernandes Gomes (2019). "Mapping the Evolution of Mercury (Hg) Research in the Amazon (1991–2017): A Scientometric Analysis" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, no. 7: 1111. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071111>

Mukesh R., Karthikeyan V., Soma, P, Sindhu P (2020). Ordinary kriging – and cokriging-based surrogate model for ionospheric TEC prediction using NavIC/ GPS data. *Acta Geophysica*, 68:1529-1547. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00473-6>

N. Pirrone, S. Cinnirella, X. Feng, R. B. Finkelman, H. R. Friedli, J. Leaner, R. Mason, A. B. Mukherjee, G. B. Stracher, D. G. Streets, and K. Telmer (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. Volume 10, issue 13 ACP, 10, 5951–5964, 2010. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5951-2010>.

OLIVEIRA, Denis Coelho de; ISAIAS, Rosy Mary dos Santos. Influence of leaflet age in anatomy and possible adaptive values of the midrib gall of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae: Caesalpinioideae). **Revista de Biología Tropical**, San José, v. 57, n. 1–2, p. 293–302, mar./jun. 2009.

P. M. Outridge, R. P. Mason, F. Wang, S. Guerrero, and L. E. Hamburguer-Boavida (2018). Updated Global and Oceanic Mercury Budgets for the United Nations Global Mercury Assessment 2018. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 20, 11466–11477. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01246>

Pan, J., Chen, M., Zhang, Z., Zhang, H., Zong, J., Wang, Z., & Zhang, G. (2023). Risk assessments of plant leaf and soil mercury pollution in different functional areas of Changchun City. *Forests*, 14(6), Article 1108. <https://doi.org/10.3390/f14061108>

Pleijel, H., Klingberg, J., Nerentorp, M., Broberg, M. C., Nyirambangutse, B., Munthe, J., and Wallin, G. (2021). Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area, *Biogeosciences*, 18, 6313–6328, <https://doi.org/10.5194/bg-18-6313-2021>.

Pleijel, H.; et al. (2021) Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area. *Biogeosciences*, 18, 6313–6328.

POKHAREL, A.; OBRIST, D. (2011). Atmospheric deposition of mercury to vegetation: A global perspective. *Environmental Science & Technology*, v. 45.

Risch, M.R.; et al. (2017) Atmospheric mercury deposition to forests in the eastern USA. *Environ. Pollut.* 229, 447–457.

Rodrigues, Y.O.S., Monteiro, L.C., de Almeida, R. *et al.* (2026). Linking remote sensing and soil properties to model mercury spatial patterns in a natural reserve in the Amazon rainforest. *Environ Monit Assess* 198, 71. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14941-3>

Sajo M. G. & Rudall P. J. (2001). Submicroscopical Features of Leaves of Xyris Species. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Vol. 44, N. 4 : pp. 405 - 410, December, 2001 ISSN 1516-8913

Samecka-Cymerman, A., & Kempers, A. J. (1999). Bioindication of heavy metals in the town Wrocław (Poland) with evergreen plants. *Atmospheric Environment*, 33(3), 419–430. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00202-7)

Schmidt, I.B.; et al. (2018) Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. *J. Appl. Ecol.*

Smith-Downey, N.V.; Sunderland, E.M.; Jacob, D.J. (2010). Anthropogenic impacts on global storage and emissions of mercury from terrestrial soils: Insights from a new global model. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 115, G03008.

Soudek, P., Kinderman, P., Maršík, P., Petrová, Š, & Vaněk, T. (2012). Biomonitoring of air pollution in Prague using tree leaves. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(2), 810–817

Stamenkovic, J.; Gustin, M.S. (2009). Nonstomatal versus Stomatal Uptake of Atmospheric Mercury. *Environ. Sci. Technol.* 43, 1367–1372.

Steve Lindberg, Russell Bullock, Ralf Ebinghaus, Daniel Engstrom, Xinbin Feng, William Fitzgerald, Nicola Pirrone, Eric Prestbo, Christian Seigneur (2007). A Synthesis of Progress and Uncertainties in Attributing the Sources of Mercury in Deposition, *AMBIO: A J. of the Human Environment*, 36(1):19-33. <https://doi.org/10.1579/0044-7447>

Teixeira, A., Pinto, J., Amaral, A., & Munhoz, C. (2017). Angiosperm species of “Cerrado” sensu stricto in Terra Ronca State Park, Brazil: floristics, phytogeography and conservation. *Brazilian Journal of Botany*, 40, 225-234. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0341-4>.

Teixeira, D.C.; et al. (2012) Litterfall mercury deposition in Atlantic forest ecosystem from SE Brazil. *Environ. Pollut.*

Xu, Y., Yuan, W., Zeng, S. et al (2025). Vegetation transition alters mercury pools and highlights dominant atmospheric deposition source in an alpine timberline soil–plant system. *Biogeochemistry* 168, 89. <https://doi.org/10.1007/s10533-025-01264-1>

Ygor O.S. Rodrigues, José G. Dórea, P.M.B. Landim, José Vicente Elias Bernardi, Lucas Cabrera Monteiro, João Pedro Rodrigues de Souza, Lilian de Castro Moraes Pinto, Iara Oliveira Fernandes, João Victor Villela de Souza, Antônia Roberto Sousa, Juruna de Paula Sousa, Bruno Leandro Oliveira Maciel, Francisco Marcos dos Santos Delvico, Jurandir Rodrigues de Souza (2022). Mercury spatiality and mobilization in roadside soils adjacent to a savannah ecological reserve. *Environmental Research*, Volume 205, 112513, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112513>

Zhou, J., Obrist, D., Dastoor, A. et al. (2021). Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat Rev Earth Environ* 2, 269–284. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>

## CAPÍTULO 2: MAPEAMENTO DE MERCÚRIO TOTAL NA VEGETAÇÃO, SERRAPILHEIRA E SOLO NO BIOMA CERRADO SENSU STRICTO, BRASIL

### RESUMO

Este capítulo avaliou a distribuição espacial do mercúrio total (HgT) nos compartimentos vegetação, serrapilheira e solo em áreas de Cerrado sensu stricto localizadas no Parque Estadual Terra Ronca, Reserva Extrativista Recanto das Araras e Área de Proteção Ambiental Serra Geral de Goiás. As amostras foram coletadas durante o período seco de 2023, processadas em laboratório e analisadas por espectrometria de absorção atômica com efeito Zeeman (RA-915+), assegurando controle de qualidade por materiais de referência certificados. A variabilidade espacial do HgT foi investigada por meio de Krigagem Ordinária e Cokrigagem Ordinária, com ajustes de semivariogramas e validação cruzada, permitindo a interpolação e o mapeamento das concentrações nos diferentes compartimentos. Os resultados indicaram concentrações de HgT no solo variando de 17,24 a 52,08  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , na serrapilheira de 10,25 a 30,93  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e na vegetação com ampla amplitude espacial, evidenciando o papel da vegetação como principal via de entrada do Hg atmosférico e do solo como reservatório de longo prazo. Os modelos geoestatísticos apresentaram bom desempenho preditivo, confirmando dependência espacial e correlação entre os compartimentos analisados. De forma integrada, os resultados indicam que o Cerrado atua como sumidouro de Hg, porém sujeito à remobilização e reemissão associadas a distúrbios como o fogo, reforçando a importância do bioma no ciclo regional do mercúrio e a relevância dos dados gerados como referência para futuras pesquisas e ações de manejo ambiental

**Palavras chaves:** *co-krigagem, krigagem, mercúrio, distribuição espacial, Cerrado*

**ABSTRACT**

This chapter evaluated the spatial distribution of total mercury (HgT) in vegetation, litter, and soil compartments in Cerrado sensu stricto areas located in Terra Ronca State Park, Recanto das Araras Extractive Reserve, and Serra Geral de Goiás Environmental Protection Area. The samples were collected during the dry season of 2023, processed in the laboratory, and analyzed by atomic absorption spectrometry with Zeeman effect (RA-915+), ensuring quality control by certified reference materials. The spatial variability of HgT was investigated using Ordinary Kriging and Ordinary Cokriging, with semivariogram adjustments and cross-validation, allowing the interpolation and mapping of concentrations in different compartments. The results indicated HgT concentrations in the soil ranging from 17.24 to 52.08 ng·g<sup>-1</sup>, in the litter from 10.25 to 30.93 ng·g<sup>-1</sup>, and in the vegetation with a wide spatial range, highlighting the role of vegetation as the main entry route for atmospheric Hg and the soil as a long-term reservoir. The geostatistical models showed good predictive performance, confirming spatial dependence and correlation between the analyzed compartments. Taken together, the results indicate that the Cerrado acts as a Hg sink, but is subject to remobilization and re-emission associated with disturbances such as fire, reinforcing the importance of the biome in the regional mercury cycle and the relevance of the data generated as a reference for future research and environmental management actions.

**Keywords:** *co-kriging, kriging, mercury, spatial distribution, Cerrado*

## 1. INTRODUÇÃO

O mercúrio (Hg) é um elemento químico tóxico à saúde humana, capaz de causar danos quando ingerido, inalado, absorvido pela pele ou em contato direto com os olhos, sobretudo em função de seus efeitos adversos sobre os sistemas embrionário, endócrino, reprodutivo, imunológico, pulmonar, nervoso, hematológico, renal e cardiovascular (Duan et al., 2020; Rice et al., 2014). Trata-se de um contaminante global de elevada persistência e capacidade de transporte atmosférico (Zhou et al., 2021). Na atmosfera, o mercúrio elementar gasoso ( $\text{Hg}^0$ ) constitui a forma predominante, podendo ser deslocado por grandes distâncias até ser depositado em ecossistemas terrestres (Xu et al., 2025; Lindberg et al., 2007). Com isso, o Hg proveniente de fontes naturais e antropogênicas pode ser transportado e depositado a grandes distâncias de seu local de emissão, fazendo com que os sumidouros terrestres desempenhem um papel central na distribuição global do Hg e nos riscos de exposição humana e ecossistêmica (Driscoll et al., 2013; Stamenkovic & Gustin, 2009).

A vegetação é capaz de capturar o Hg atmosférico por meio do acúmulo de Hg particulado adsorvido na superfície da folha, e absorvido por via estomática, que é a via dominante de Hg incorporado de modo foliar (Zhou et al., 2018). O Hg na folha é incorporado nos solos na forma de serrapilheira (deposição seca) e pela precipitação (deposição úmida). A deposição seca é responsável por aproximadamente 70% do fluxo de entrada de Hg em solos naturais superficiais (Ma et al., 2022). Com isso, a principal fonte de mercúrio na biomassa acima do solo está relacionada à absorção atmosférica (Pokharel & Obrist, 2011). No processo de decomposição da serrapilheira, o Hg externo (por exemplo, na atmosfera ou no solo) pode ser sequestrado pela serrapilheira em decomposição o que eleva os níveis de Hg da matéria orgânica em estado de decomposição (Chow & Tsui, 2019). Por sua vez, os solos são um importante sumidouro de Hg liberados no meio ambiente. O Hg está fortemente ligado a matéria orgânica, minerais argilosos, óxidos de ferro e alumínio, além do acúmulo de carbono, que controla o acúmulo de Hg atmosférico nos solos (Ballabio et al., 2021). Então, o estudo dos compartimentos ambientais: vegetação, serrapilheira e solo, torna-se fundamental, tendo em vista as queimadas como um mecanismo de acelerar as emissões para a atmosfera.

As florestas passaram a ser amplamente reconhecidas como elementos centrais no ciclo do mercúrio (Hg), atuando não apenas como sumidouros e reservatórios, mas também como fontes episódicas em situações de perturbação, como incêndios, o que traz implicações relevantes para a efetividade das políticas de

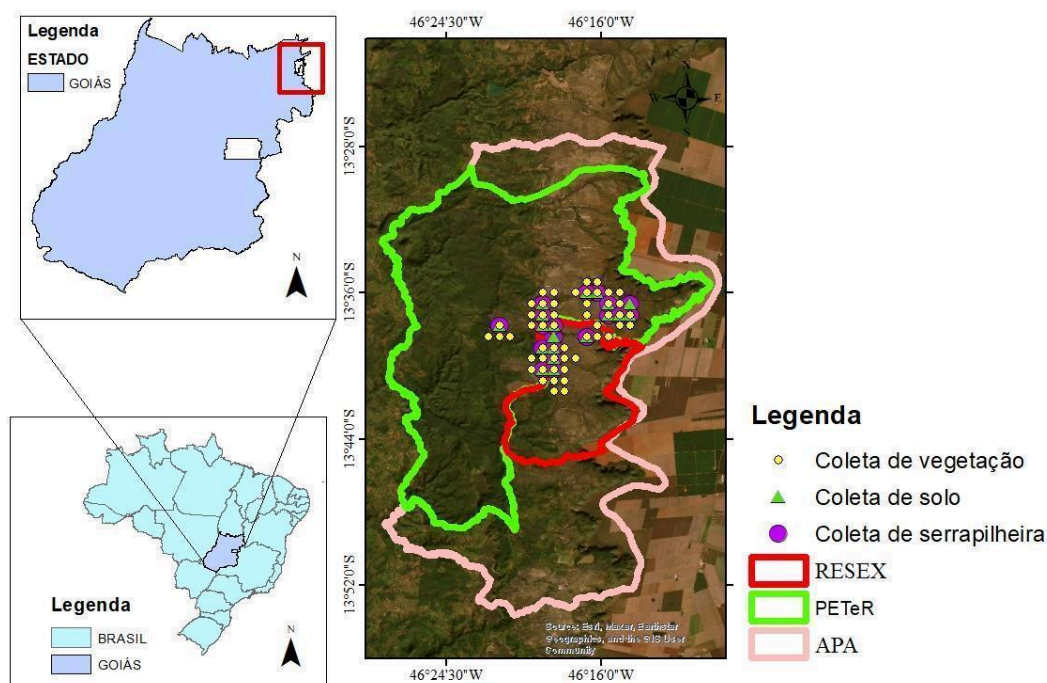
controle do Hg (Driscoll et al., 2013; Stamenkovic & Gustin, 2009). O fogo constitui um mecanismo relevante por meio do qual o mercúrio (Hg) previamente armazenado pode ser rapidamente reemitido para a atmosfera, convertendo as florestas de sumidouros em fontes episódicas. Estudos recentes conduzidos no Cerrado brasileiro indicam que a intensificação do uso da terra, associada às características geológicas regionais, exerce forte controle sobre a mobilização e o acúmulo de elementos potencialmente tóxicos, evidenciando a elevada sensibilidade dos ecossistemas naturais às pressões antrópicas, mesmo em áreas aparentemente preservadas (Monteiro et al., 2025). Atualmente, as tecnologias de sensoriamento remoto proporcionam novas oportunidades para a caracterização dos fatores ambientais que controlam o ciclo do mercúrio (Hg) em grandes escalas espaciais. Nesse contexto, abordagens geoestatísticas, como a Krigagem Ordinária (KO) e Cokrigagem Ordinária (CO), configura-se como ferramentas robustas para a modelagem de padrões espaciais e a identificação de áreas com maiores concentrações de Hg total (HgT) (Rodrigues et al., 2025).

Visto isso, ainda são escassos os estudos integrados que quantificam simultaneamente o mercúrio (Hg) em folhas vivas, camadas de detritos e solos, incorporando a variabilidade em nível de espécie, especialmente quando comparados àqueles realizados em latitudes mais elevadas (Millhollen et al., 2006; Smith-Downey et al., 2010; Teixeira et al., 2012; Pleijel et al., 2021). Essa lacuna é particularmente relevante, uma vez que as florestas tropicais podem concentrar grandes estoques de Hg, ao mesmo tempo em que estão expostas a pressões e perturbações crescentes associadas ao uso da terra. Embora existam revisões e estudos no Cerrado sobre Hg, existem poucos estudos sobre vegetação, solo e serrapilheira com mapas e avaliações sobre a distribuição espacial de mercúrio total (HgT) em Unidades de Conservação ambiental no bioma Cerrado sensu stricto (Neto M. & Brito D., 2021). Este capítulo tem por objetivo avaliar e mapear espacialmente a distribuição de mercúrio total em vegetação, solo e serrapilheira do Cerrado sensu stricto. Este estudo parte da hipótese de que áreas de Cerrado sensu stricto localizadas próximas a fontes antrópicas apresentam concentrações mais elevadas de HgT em todos os compartimentos analisados: vegetação, serrapilheira e solo, quando comparadas a áreas mais distantes dessas fontes permitindo investigar padrões espaciais e relações entre compartimentos no Cerrado sensu stricto.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O Parque Estadual Terra Ronca (PETeR), a Reserva Extrativista Recanto das Araras (RESEX) e a Área de Proteção Ambiental Serra Geral de Goiás (APA Serra Geral) estão localizados no estado de Goiás, abrangendo os municípios de São Domingos e Guarani de Goiás, e representam áreas de elevada relevância para a conservação ambiental (Governo de Goiás, 2017). Com uma área aproximada de 57 mil hectares, o PETeR destaca-se pela expressiva ocorrência de cavernas e sistemas fluviais subterrâneos, constituindo um dos mais importantes complexos espeleológicos do Brasil.



**Figura 1.** Área de estudo e localização das unidades amostrais

O Parque Estadual Terra Ronca (PETeR), a Reserva Extrativista Recanto das Araras (RESEX) e a Área de Proteção Ambiental Serra Geral desempenham papel fundamental na conservação de extensas áreas de vegetação do bioma Cerrado, predominando a fitofisionomia de Cerrado *sensu stricto*. De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tropical do tipo Aw, caracterizado por duas estações bem definidas: um período seco, correspondente ao inverno (abril a setembro), e um período chuvoso, associado ao verão (outubro a março) (Alvares et al., 2013).

## **2.2. Coleta das amostras**

Foram coletadas em 21 pontos espalhados pelo PETeR durante o período de inverno seco, nos dias 27, 28, 29 e 30 de junho de 2023 amostras de solo, serrapilheira e em 13 pontos amostras de vegetação por meio do método de ponto quadrante onde uma trena foi esticada partindo do ponto central em quatro direções até alcançar o indivíduo de vegetação arbórea nativa viva mais próximo. As unidades amostrais foram determinadas por áreas de bioma de Cerrado sensu stricto. O indivíduo de vegetação arbórea nativa foi cortado a amostra junto ao pecíolo utilizando uma tesoura de poda, guardada em saco de papel para conter a transpiração. As amostras de serrapilheira foram coletadas manualmente utilizando uma luva emborrachada nitrílico e armazenadas em sacos plásticos. As amostras de solo foram coletadas a profundidades de 0 a 20 cm, classificados como Neosolo, utilizando um trado holandês e armazenadas em sacos plásticos.

## **2.3. Processamento das amostras em arbóreas**

O processamento aconteceu a partir da secagem das amostras em uma câmara climática modelo MA 1403/ 450UR a 60°C por cerca de 48 horas. Posteriormente, foram trituradas em um triturador e armazenadas em microtubos de plástico, à temperatura ambiente (Kelly et. al 2012).

## **2.4. Processamento das amostras de serrapilheira**

As amostras de serrapilheira destinadas à quantificação de HgT foram inicialmente peneiradas utilizando peneira metálica de malha fina de 2 mm para remover possíveis partículas minerais e fragmentos de solo e secas em câmara climática modelo MA 1403/ 450UR a 60 °C por aproximadamente 48 horas. Em seguida, foram trituradas utilizando um triturador. As amostras já trituradas foram armazenadas em microtubos plásticos à temperatura ambiente (Kelly et. al 2012).

## **2.5. Processamento das amostras de solo**

As amostras destinadas à análise de HgT foram secas em câmara climática MA 1403/ 450UR a 50 °C, passadas por peneiras até a obtenção de frações menores que 125 µm e, posteriormente, armazenadas em microtubos plásticos à temperatura ambiente.

## **2.6. Determinação de mercúrio total (HgT) de arbóreas**

Foi utilizado o equipamento de espectrometria de absorção atômica de Zeeman RA-915+ e PYRO-915 – Lumex Módulo 2, com uma temperatura variando entre

520-580°C para determinar as concentrações de HgT (Lumex Instruments, 2026). O resultado dos dados foi assegurado por meio da análise em triplicatas e duplicatas com o coeficiente de variação apresentando entre 0 e 10%. Foi empregado amostras de referência certificada de folhas de maçã (NIST-1515) para avaliar a acurácia do método analítico, com taxa de recuperação média entre 80 e 110%, e amostras em branco.

### **2.7. Determinação de mercúrio total (HgT) de serrapilheira**

Foi utilizado o equipamento de espectrometria de absorção atômica com efeito Zeeman RA-915+ associado ao módulo PYRO-915 (Lumex, Módulo 2), operando com temperatura entre 520 e 580 °C para a determinação das concentrações de HgT (Lumex Instruments, 2026). A confiabilidade dos resultados foi garantida por análises realizadas em triplicata e duplicata, apresentando coeficiente de variação entre 0% e 10%. Para avaliar a acurácia do método analítico, foram empregadas amostras de referência certificada (SRM1515), que apresentaram taxa média de recuperação entre 80% e 110%, além de amostras em branco.

### **2.8. Determinação de mercúrio total (HgT) do solo**

Foi utilizado o equipamento de espectrometria de absorção atômica com efeito Zeeman RA-915+ associado ao módulo PYRO-915 (Lumex, Módulo 2), operando com temperatura entre 520 e 580 °C para a determinação das concentrações de HgT no solo (Lumex Instruments, 2026). A confiabilidade dos resultados foi assegurada por análises realizadas em triplicata e duplicata, com coeficiente de variação variando entre 0% e 10%. Para avaliar a acurácia do método analítico, foram utilizadas amostras de referência certificada de solo (PACS-3), que apresentaram taxa média de recuperação entre 80% e 110%, além de amostras em branco.

### **2.9. Análises geoestatísticas**

#### **2.9.1. Krigagem Ordinária (KO)**

Para a análise exploratória de dados, a autocorrelação entre a quantidade de Hg a fim de identificar possíveis padrões espaciais foi aplicado a Krigagem ordinária (KO). Método geoestatístico com base na amostragem, realizando o processo de inferência espacial denominado interpolação de dados. É um método de estimativa e, dessa forma, um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima (Yamamoto e Landim, 2013).

A Krigagem ordinária assume que a variável de interesse, pode ser modelada como um processo estocástico, cuja estrutura espacial pode ser descrita por um variograma.

O variograma mede a dependência espacial entre as amostras para prever valores em locais não amostrados (Mukesh et al., 2020).

O estimador da Krigagem ordinária é expresso como:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

$Z_{KO}^*(x_0)$ : valor estimado pelo método da Krigagem Ordinária no ponto de localização;

$Z(X_i)$ : valor observado da variável regionalizada no ponto amostral  $x_i$ ;

$\lambda_i$ : peso atribuído ao valor observado  $Z(x_i)$ , determinado pelo sistema de equações da krigagem.

$n$ : número total de pontos amostrais utilizados na estimativa.

$x_0$ : ponto onde se deseja estimar o valor da variável.

$x_i$ : posição espacial dos pontos amostrais utilizados na krigagem.

A elaboração dos mapas e das análises geoestatísticas foi realizada no software *ArcMap*, versão 10.08, desenvolvido pela Esri (Environmental Systems Research Institute). O tratamento, a organização e a representação espacial dos dados foram conduzidos no ambiente do próprio software, possibilitando a integração e análise das informações espaciais. As análises geoestatísticas foram conduzidas por meio da extensão *Geostatistical Analyst*, utilizando a ferramenta *Geostatistical Wizard*, disponível no *ArcMap*.

### 2.9.2. CoKrigagem ordinária (CK)

A Cokrigagem é um método estatístico, estimador linear que estima um campo aleatório com base na interpolação geoespacial que estende os princípios da Krigagem para o contexto multivariado (Payares-Garcia et al., 2023). A Cokrigagem considera múltiplas variáveis simultaneamente, aproveitando a autocorrelação entre elas para melhorar a precisão das estimativas espaciais (Uowicz et al., 2021).

Este modelo leva em conta a informação disponível de todas as variáveis correlacionadas para estimar valores em locais não amostrados, isso envolve a modelagem da covariância entre as variáveis que descrevem como as variáveis se correlacionam espacialmente entre si (Magno et al., 2021).

O estimador da Cokrigagem é expresso como:

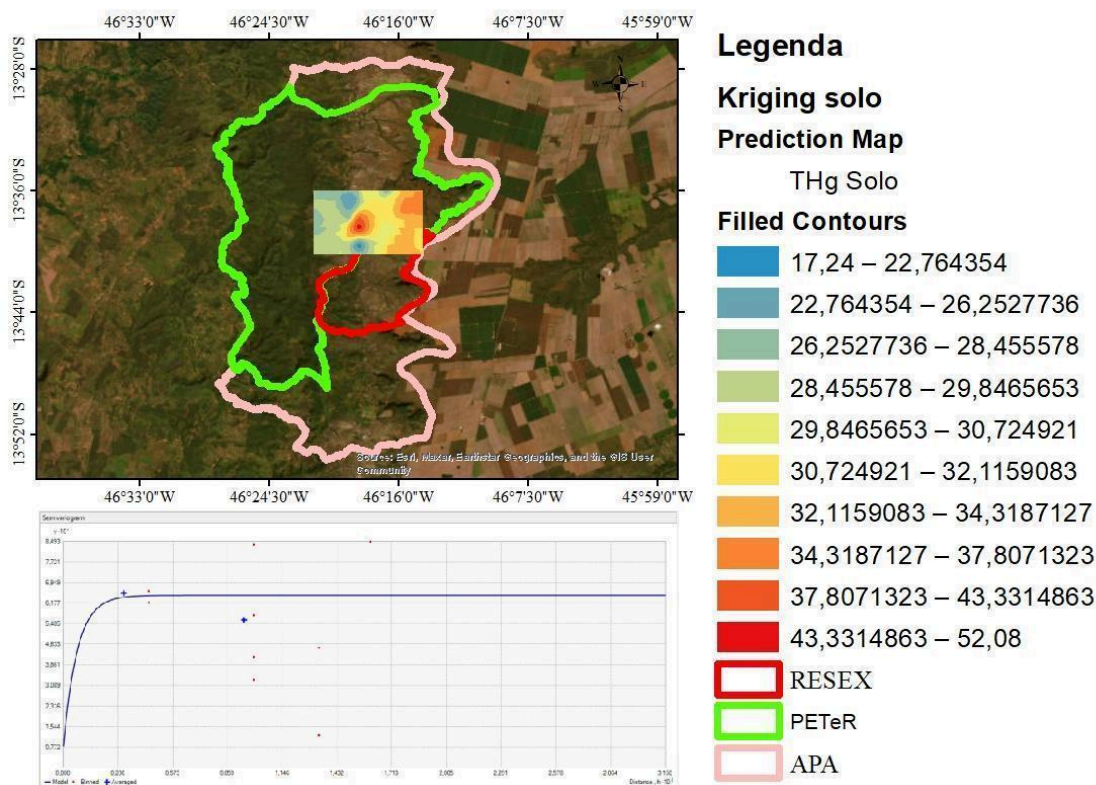
$$Z_{CK}^*(X) = \sum_{\alpha=1}^{n(X)} \lambda_{\alpha}(x)z(x_{\alpha}) + \sum_{\beta=1}^{n(Y)} \lambda_{\beta}(x)y(x_{\beta}),$$

desse modo, será calculado a autocorrelação entre as concentrações de Hg na vegetação, serrapilheira e o solo para entender as inter-relações e dependências espaciais. Nesse contexto, Z corresponde à estimativa da variável de interesse, enquanto  $\lambda$  representa os pesos atribuídos às variáveis dependentes ( $\alpha$ ) e independentes ( $\beta$ ). O termo n refere-se aos pontos vizinhos espacialmente correlacionados às coordenadas x e y.

A elaboração dos mapas, bem como a realização das análises geoestatísticas, foi conduzida no software *ArcMap*, versão 10.08, desenvolvido pela Esri (Environmental Systems Research Institute). As análises geoestatísticas foram executadas por meio da extensão Geostatistical Analyst, utilizando a ferramenta Geostatistical Wizard disponível no ArcMap.

### 3. RESULTADOS

A análise da dependência espacial das concentrações de HgT no solo por meio da modelagem do semivariograma experimental, ajustado a um modelo exponencial com efeito pepita (nugget) (Figura 2). O erro padronizado médio (Mean Standardized Error) apresentou valor de 0,01580772, extremamente próximo de zero, indicando ausência de viés sistemático nas predições realizadas pelo modelo de Krigagem. Esse resultado demonstra que o modelo não tende a superestimar nem subestimar os valores observados de HgT (Figura 2). O erro médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized Error) foi de 0,8952423, o que indica que a variância estimada pelo modelo está adequadamente ajustada à variabilidade real dos dados. Valores próximos de 01 são indicativos de bom desempenho do modelo geoestatístico.

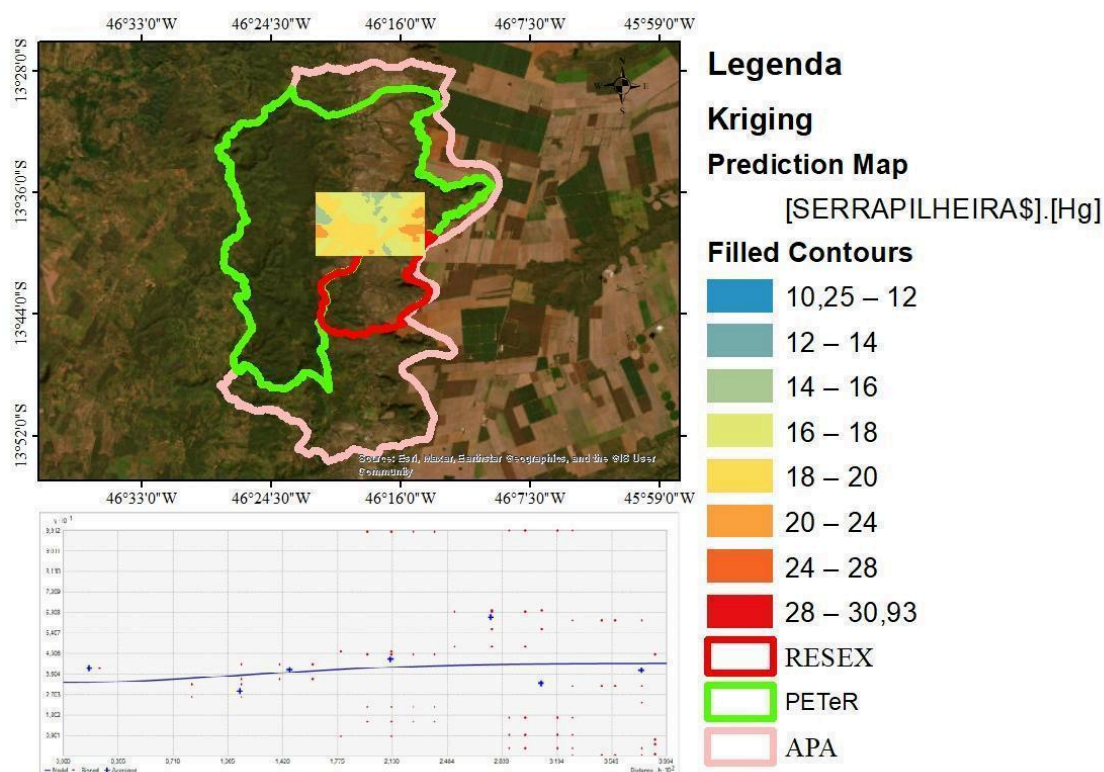


**Figura 2.** Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma de solo, Krigagem ordinária

As concentrações de HgT determinadas nas amostras de solo do Parque Estadual Terra Ronca, variaram de 17,24 ng·g<sup>-1</sup> a 52,08 ng·g<sup>-1</sup>, evidenciando expressiva variabilidade espacial dos teores de mercúrio na área de estudo. A média aritmética das concentrações de HgT foi de 31,42 ng·g<sup>-1</sup>, enquanto a mediana foi de 30,35 ng·g<sup>-1</sup>. Os menores valores de HgT ( $\leq 18,00$  ng·g<sup>-1</sup>) foram observados em pontos específicos da área, enquanto as maiores concentrações, superiores a 40,00 ng·g<sup>-1</sup>, ocorreram de forma pontual, contribuindo para o aumento da amplitude dos dados.

As concentrações de HgT determinadas na serrapilheira, variaram entre 10,25 ng·g<sup>-1</sup> e 30,93 ng·g<sup>-1</sup>, evidenciando variabilidade espacial moderada na distribuição do elemento nesse compartimento ambiental (Figura 3). Os valores mais elevados foram observados de forma pontual, com destaque para uma concentração máxima de 30,93 ng·g<sup>-1</sup>, enquanto os menores valores ( $\leq 12,00$  ng·g<sup>-1</sup>) ocorreram em áreas específicas da unidade de conservação. A dependência espacial das concentrações de HgT na serrapilheira foi avaliada por meio do ajuste do semivariograma experimental (Figura 3), sendo selecionado um modelo estável com efeito pepita (nugget). A validação

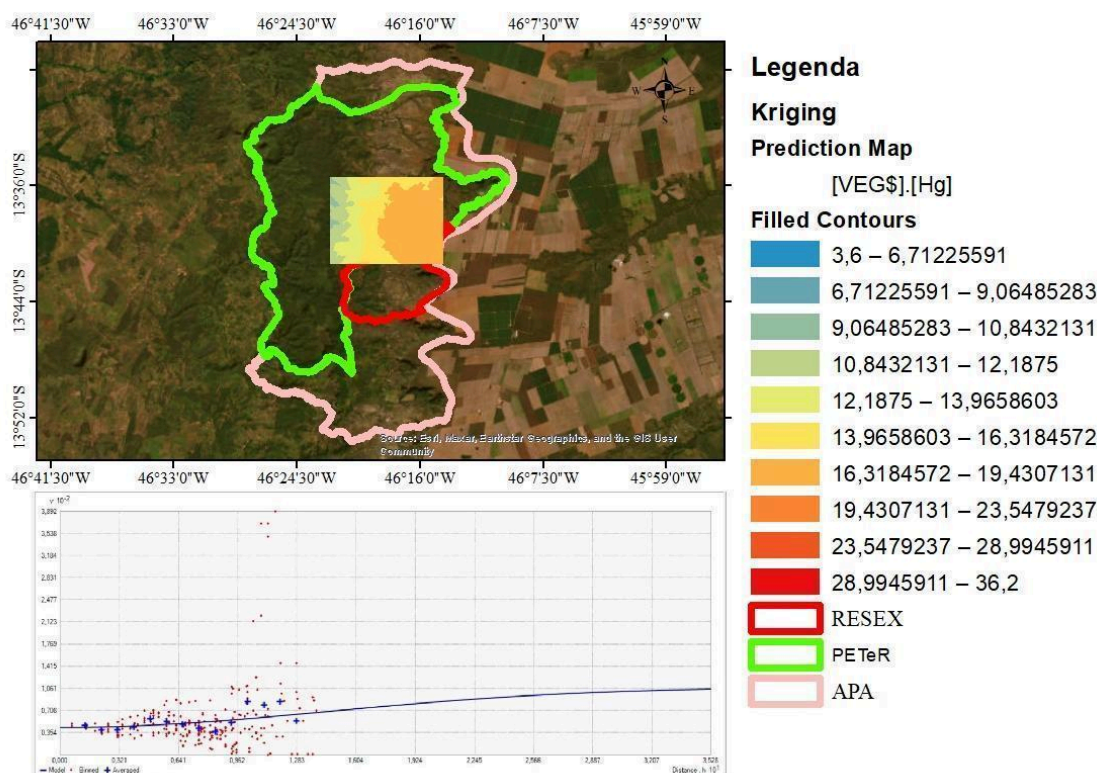
cruzada indicou bom desempenho preditivo do modelo geoestatístico adotado. O erro médio (Mean Error) apresentou valor de 0,04374873, próximo de zero, indicando ausência de viés sistemático nas estimativas das concentrações de HgT. O erro médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized Error) apresentou valor de 0,9194158, indicando que a variância estimada pelo modelo está adequadamente ajustada à variabilidade observada nos dados.



**Figura 3.** Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma de serrapilheira, Krigagem ordinária

Para a vegetação o ajuste do semivariograma foi realizado também a partir de um modelo estável com efeito pepita (nugget) (Figura 4). A validação cruzada do modelo de Krigagem indicou desempenho satisfatório na predição das concentrações de HgT na vegetação. O erro médio (Mean Error) apresentou valor de  $-0,2248789$ , indicando leve tendência à subestimação dos valores observados, porém com magnitude reduzida. O erro médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized Error) apresentou valor de  $0,9974254$ , considerado praticamente igual à unidade, o que demonstra que a variância estimada pelo modelo está adequadamente ajustada à variabilidade observada nos dados reais. Esse resultado indica que as

incertezas associadas às estimativas espaciais foram corretamente quantificadas pelo modelo geoestatístico. A proximidade do erro padronizado médio em relação a zero e do erro médio quadrático padronizado em relação à unidade confirma a robustez e confiabilidade do modelo.

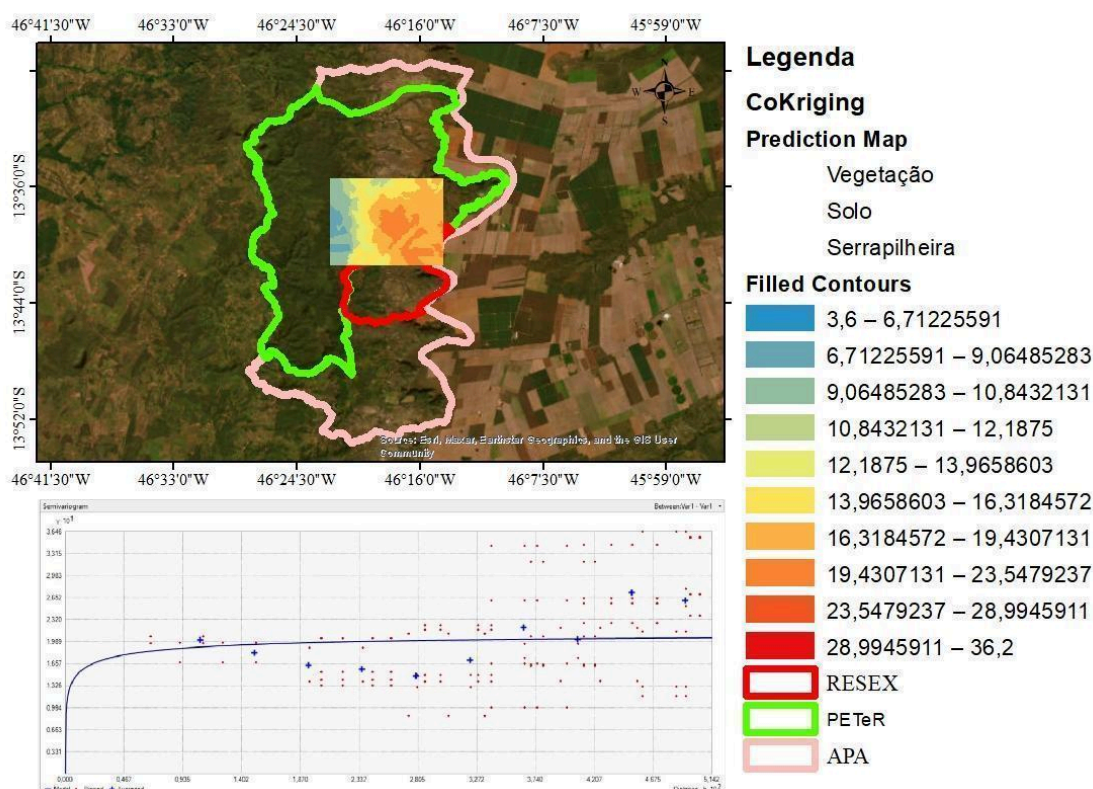


**Figura 4.** Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma da vegetação, Krigagem ordinária

Os menores valores de HgT ( $\leq 5,0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) foram observados com destaque para concentrações de  $3,6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $4,8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e  $6,4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , indicando baixa acumulação de mercúrio na biomassa vegetal nesses locais. Por outro lado, as maiores concentrações, superiores a  $30,0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , ocorreram de forma pontual, com valores máximos de  $32,1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e  $36,2 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , contribuindo significativamente para a amplitude dos dados observados. A variabilidade espacial observada nos valores de HgT na vegetação reforça o papel desse compartimento como um receptor dinâmico de Hg.

A análise integrada da distribuição espacial do HgT nos compartimentos solo, serrapilheira e vegetação realizada por meio da aplicação da Cokrigagem ordinária considerou a transformação logarítmica (Log) dos dados e ausência de remoção de tendência (Figura 5). A validação cruzada do modelo de Cokrigagem indicou bom desempenho preditivo na estimativa das concentrações de HgT. O erro médio (Mean

Error) apresentou valor de  $-0,2222698$ , indicando leve tendência à subestimação dos valores observados, porém com magnitude reduzida. O erro médio quadrático padronizado (Root-Mean-Square Standardized Error) foi de  $0,9151225$ , valor considerado próximo da unidade, demonstrando que a variância estimada pelo modelo está adequadamente ajustada à variabilidade real dos dados.



**Figura 5.** Mapa de distribuição espacial de HgT e Semivariograma, CoKrigagem ordinária

#### 4. DISCUSSÃO

A literatura brasileira sobre HgT em serrapilheira ainda é relativamente escassa e concentrada em poucos biomas, mas revela um papel central como um compartimento de acumulação de Hg atmosférico e de transferência para o solo e para a biota terrestre (Chow E. & Tsui T. K., 2019; Yuan T. et. al., 2023; Fernandes I. O. et. al., 2024). As concentrações de HgT na serrapilheira de ecossistemas brasileiros situam-se, em geral, na faixa de dezenas a poucas centenas de  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , com forte modulação por bioma, tipo de cobertura vegetal e influência antrópica (Teixeira et. al., 2012; Teixeira et. al., 2017). Os valores obtidos no presente estudo ( $n = 21$ ; média  $\approx 17,9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ; mediana  $\approx 16,9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ; mínimo =  $10,25 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ; máximo =  $30,93 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) posicionam-se no extremo inferior da faixa descrita para florestas tropicais úmidas

brasileiras (Silva-Filho et. al., 2006; Fostier et. al., 2015). Os valores encontrados são mais próximos dos valores registrados em ambientes savânicos e manguezais do que daqueles observados em fragmentos florestais urbanos ou em áreas diretamente sob influência de mineração (Teixeira et al., 2012).

Os solos da Amazônia apresentam concentrações naturais de HgT entre 21,5  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e 208  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (Tabela 1), podendo chegar a valores muito mais altos em áreas impactadas por atividades humanas (Francielle et. al., 2022). No Cerrado, as concentrações variam de 15  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  a 182  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , com valores similares em áreas de planície alagável (Tabela 1) (Carvalho et. al., 2019). No compartimento solo, as concentrações de HgT encontrados variaram entre 17,24  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e 52,08  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , com a maioria dos valores concentrando-se entre 25  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  e 40  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , padrão típico de solos tropicais altamente intemperizados (Gurujão R. S. et. al., 2010).

**Tabela 1.** Concentrações de HgT ( $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) em solos de diferentes biomas e países

<b>Bioma</b>	<b>Compartimento</b>	<b>Concentração de HgT (<math>\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}</math>)</b>	<b>Referência</b>
Brasil (Cerrado)	Solo	17,24 - 52,08	Este estudo
Brasil (Cerrado)	Solo	15 - 182	Carvalho et. al., 2019
Brasil (Amazônia)	Solo	21,5 - 208	Francielle et. al., 2022
China	Solo	263,1 – 237,2	Niu et. al., 2011
Colômbia	Solo	55,9–2587,4	Rosa-Mendoza et. al., 2025

As concentrações de HgT determinadas na vegetação é compatível com valores reportados para áreas naturais do Cerrado e inferiores aos observados em ambientes fortemente impactados por atividades antrópicas intensivas:

**Tabela 2.** Concentrações médias de HgT em folhas em estudos realizados em diferentes biomas e países

<b>Países</b>	<b>Média HgT (<math>\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}</math>)</b>	<b>Referência</b>
Brasil (Cerrado)	15,87	Este estudo

Brasil (Mata Atlântica)	73	De França et al., 2004
Brasil (Amazônia)	46	Michelazzo et al., 2010
Brasil (Cerrado)	34,37	Pedrosa et. al., 2026
China	48,70	Pan et al., 2023
Suécia	34,1	Pleijel et al., 2021

---

O valor médio de 34,37 ng g<sup>-1</sup> de Hg encontrado na vegetação do Cerrado no Brasil representa a integração espacial e ecológica de processos de deposição e retenção de origem antrópica (Pedrosa et. al., 2026). No presente estudo realizado no PETeR, as maiores concentrações de Hg foram observadas em áreas próximas à rodovia BR-020, indicando a influência direta das emissões veiculares e da deposição atmosférica associada ao tráfego. Esse padrão é consistente com resultados reportados na literatura (Pan et. al., 2023; Pedrosa et. al., 2026), no qual as concentrações mais elevadas também foram registradas em áreas sujeitas à intensa circulação de veículos, reforçando o papel das rodovias como importantes fontes difusas de mercúrio para a vegetação e os solos adjacentes. Na Suécia atingiram cerca de 21,5 ng·g<sup>-1</sup> ao final da estação de crescimento, enquanto agulhas de coníferas mais antigas (C+3) apresentaram valores mais elevados, em torno de 34,1 ng·g<sup>-1</sup>, evidenciando a influência direta da idade do tecido foliar no acúmulo do metal (Pleijel et al., 2021).

## 5. CONCLUSÃO

A partir deste estudo é possível inferir que o Cerrado *sensu stricto* desempenha papel relevante no ciclo biogeoquímico do Hg, atuando como sumidouro natural e, sob condições de perturbação, como fonte potencial desse elemento para a atmosfera. As concentrações de HgT observadas no solo, na serrapilheira e na vegetação revelam elevada variabilidade espacial e são compatíveis com ambientes tropicais naturais, destacando a vegetação como importante via de incorporação do Hg atmosférico e a serrapilheira como compartimento intermediário de transferência para o solo, principal reservatório de longo prazo. As análises geoestatísticas confirmaram a dependência espacial e a inter-relação entre os compartimentos. O fogo se mostra um fator crítico por promover a remobilização e reemissão rápida do Hg previamente acumulado,

convertendo o ecossistema de sumidouro em fonte episódica, especialmente diante da recorrência de queimadas no bioma. Nesse sentido, este trabalho fornece dados integrados sobre Hg no Cerrado sensu stricto, estabelecendo valores de referência fundamentais para futuras pesquisas, contribuindo para reduzir lacunas de conhecimento no bioma Cerrado e subsidiar avaliações ambientais e estratégias de manejo em um bioma estratégico ainda pouco explorado sob a perspectiva do ciclo do mercúrio.

## 6. REFERÊNCIAS

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Anne Hélène Fostier, José Javier Melendez-Perez, Larissa Richter (2015). Litter mercury deposition in the Amazonian rainforest. *Environmental Pollution*, Volume 206. Pages 605-610

Arnold, Jennifer; Gustin, Mae Sexauer; Weisberg, Peter J.(2018). Evidence for Nonstomatal Uptake of Hg by Aspen and Translocation of Hg from Foliage to Tree Rings in Austrian Pine. *Environmental Science & Technology*. V. 52. doi: 10.1021/acs.est.7b04468

Chow, E., Tsui, M.TK (2019). Elucidating Microbial Pathways of Mercury Methylation During Litter Decomposition. *Bull Environ Contam Toxicol* 103, 617–622.

Chu, Zhaohan; Zhou, Yunzhuo; Liu, Maodian; Lin, Huiming; Cheng, Menghan; Xie, Han; Yuan, Liuliang; Zhang, Zhihao; Zhang, Qianru; Li, Chengcheng; Chen, Yuang; Guo, Yanpei; Chen, Long; Wang, Xuejun(2023). Large-Scale Observations Support Aboveground Vegetation as an Important Biological Mercury Sink in the Tibetan Plateau. *Environmental Science & Technology*. V. 57 - 45 0013-936X doi: 10.1021/acs.est.3c05164

Daniel C. Teixeira, Luiz D. Lacerda, Emmanoel V. Silva-Filho (2017). Mercury sequestration by rainforests: The influence of microclimate and different successional stages. *Chemosphere*, Volume 168. Pages 1186-1193

Daniel C. Teixeira, Rita C. Montezuma, Rog erio R. Oliveira, Emmanoel V. Silva-Filho (2012). Litterfall mercury deposition in Atlantic forest ecosystem from SE – Brazil. *Environmental Pollution*. Volume 164. Pages 11-15

David Payares-Garcia, Frank Osei, Jorge Mateu, Alfred Stein (2023). A Poisson cokriging method for bivariate count data. *Spatial Statistics*, Volume 57, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2023.100769>

de Britto Pedrosa, R.F.C., Monteiro, L.C., Rodrigues, Y.O.S. et al. (2026). Spatial Distribution of Mercury in Vegetation and Soil in a Conservation Unit Near Highways. *Water Air Soil Pollut* 237, 110. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08797-z>

De Franca, E. J., De Nadai Fernandes, E. A., Bacchi, M. A., & Saiki, M. (2004). Native trees as biomonitors of Chemical elements in the biodiversity conservation of the Atlantic

De la Rosa-Mendoza, M., Viña-Pico, M., & Marrugo-Negrete, J. (2025). Phytoremediation of Soils Contaminated with Mercury Using *Piper marginatum* in Ayapel, Colombia. *Soil Systems*, 9(3), 68. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9030068>

Driscoll, C.T.; Mason, R.P.; Chan, H.M.; Jacob, D.J.; Pirrone, N. (2013) Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environ. Sci. Technol.* 47, 4967–4983.

Emmanoel V. Silva-Filho, Wilson Machado, Rogério R. Oliveira, Silvia M. Sella, Luiz D. Lacerda (2006). Mercury deposition through litterfall in an Atlantic Forest at Ilha Grande, Southeast Brazil. *Chemosphere*, Volume 65, Issue 1. Pages 2477-2484

Fernandes, I.O., Monteiro, L.C., de Miranda, V.L. et al (2024). Mercury distribution in organisms, litter, and soils of the Middle Araguaia floodplain in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 31, 20925–20940.

Forest. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 49, 579–592. <https://doi.org/10.1007/s10874-004-1267-y>

Francielle R.D. Lima, Polyana Pereira, Ediu C. Silva Junior, Isabela C.F. Vasques, Jakeline R. Oliveira, Cláudia C. Windmöller, Alberto V. Inda, David C. Weindorf, Nilton Curi, Bruno T. Ribeiro, Luiz R.G. Guilherme, João José Marques (2022). Geochemistry signatures of mercury in soils of the Amazon rainforest biome. *Environmental Research*, Volume 215, Part 1, 114147, ISSN 0013-9351

Francielle R.D. Lima, Polyana Pereira, Isabela C.F. Vasques, Ediu C. Silva Junior, Marcelo Mancini, Jakeline R. Oliveira, Marcelo T.A. Prianti, Cláudia C. Windmöller, David C. Weindorf, Nilton Curi, Bruno T. Ribeiro, Jacob Richardson, João José Marques, Luiz Roberto G. Guilherme (2023). Predictive modeling of total Hg background concentration in soils of the Amazon Rainforest biome with support of proximal sensors and auxiliary variables. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 129, 104510, ISSN 0895-9811

G.S. Carvalho, J.R. Oliveira, N. Curi, D.G. Schulze, J.J. Marques (2019). Selenium and mercury in Brazilian Cerrado soils and their relationships with physical and chemical soil characteristics. *Chemosphere*, Volume 218, 2019, Pages 412-415, ISSN 0045-6535

Honghong Ma, Hangxin Cheng PhD, Fei Guo, Li Zhang, Shiqi Tang, Zheng Yang, Min Peng. Distribution of mercury in foliage, litter and soil profiles in forests of the Qinling Mountains, China. *Environmental Research*. Volume 211, August 2022, 113017

Kelly, J.G., Han, F.X., Su, Y. *et al.* (2012). Rapid Determination of Mercury in Contaminated Soil and Plant Samples Using Portable Mercury Direct Analyzer without Sample Preparation, a Comparative Study. *Water Air Soil Pollut* 223, 2361–2371. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1030-3>

LUMEX INSTRUMENTS. RA-915M mercury analyzer with PYRO-915+ thermal decomposition attachment. Disponível em: <https://www.lumexinstruments.com/catalog/atomic-absorption-spectrometry/ra-915m-pyro-915.php>. Acesso em: 11 mar. 2026.

Magno, M., Luffman, I., & Nandi, A. (2021). Evaluating Spatial Regression-Informed Cokriging of Metals in Soils near Abandoned Mines in Bumpus Cove, Tennessee, USA. *Geosciences*, 11(11), 434. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110434>

Michelazzo, P. A. M., Fostier, A. H., Magarelli, G., Santos, J. C., & de Carvalho, J. A., Jr. (2010). Mercury emissions from forest burning in southern Amazon. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2009GL042220>

Millhollen, A.G.; Gustin, M.S.; Obrist, D. (2006). Foliar Mercury Accumulation and Exchange for Three Tree Species. *Environ. Sci. Technol.* 40, 6001–6006.

Monteiro, L.C., Vieira, L.C.G., Bernardi, J.V.E. *et al.* (2025). Combined effects of land use and geology on potentially toxic elements contamination in lacustrine sediments from the Araguaia River floodplain, Brazilian Savanna. *Environ Monit Assess* 197, 683. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14118-y>

Mukesh R., Karthikeyan V., Soma, P, Sindhu P (2020). Ordinary kriging – and cokriging-based surrogate model for ionospheric TEC prediction using NavIC/ GPS data. *Acta Geophysica*, 68:1529-1547. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00473-6>

Neto, M V. M.; Brito D.Q. (2021). Mercury (Hg) reserarches in Brazilian biomas: A scientometric analysis between the yeasers 1991 and 2019. *Journal of Veterinary Science and Research*, 1-13.

P. M.Outridge, R. P. Mason, F. Wang, S. Guerrero, and L. E. Hamburguer-Boavida (2018). Updated Global and Oceanic Mercury Budgets for the United Nations Global Mercury Assessment 2018. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 20, 11466–11477. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01246>

Pan, J., Chen, M., Zhang, Z., Zhang, H., Zong, J., Wang, Z., & Zhang, G. (2023). Risk assessments of plant leaf and soil mercury pollution in different functional areas of Changchun City. *Forests*, 14(6), Article 1108. <https://doi.org/10.3390/f14061108>

Pleijel, H., Klingberg, J., Nerentorp, M., Broberg, M. C., Nyirambangutse, B., Munthe, J., and Wallin, G. (2021). Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area, *Biogeosciences*, 18, 6313–6328, <https://doi.org/10.5194/bg-18-6313-2021>.

Robson da Silva Gurjão, Vanda Porpino Lemos, Marcondes Lima da Costa, Heronides Adonias Dantas Filho, Kelly das Graças Fernandes Dantas e Wivian Thais dos Santos Lima (2010). COMPORTAMENTO DO MERCÚRIO EM PERFIS DE SOLOS DO SÍTIO ILHA DE TERRA-CAXIUANÃ, PARÁ. *Quim. Nova*, Vol. 33, No. 4, 821-826

Roitman, Iris AND Bustamante, Mercedes M. C. AND Haidar, Ricardo F. AND Shimbo, Julia Z. AND Abdala, Guilherme C. AND Eiten, George AND Fagg, Christopher W. AND Felfili, Maria Cristina AND Felfili, Jeanine Maria AND Jacobson, Tamiel K. B. AND Lindoso, Galiana S. AND Keller, Michael AND Lenza, Eddie AND Miranda, Sabrina C. AND Pinto, José Roberto R. AND Rodrigues, Ariane A. AND Delitti, Wellington B. C. AND Roitman, Pedro AND Sampaio, Jhames M. (2018). Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. *Plos One*. Volume 13, pag. 1-2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196742>

Souza Ferreira R. Q., Costas Santos L. A., Teixeira P. R., Borger L., Souza P. B. (2020). Estrutura Fitossociológica de um Cerrado Sensus Stricto, em Gurupi, Tocantins. *Journal of Social, Technological and Environmental Science*. v.9, n.1, jan.- abr.2020 - p.316-329. DOI <http://dx.doi.org/10.21664/2238>

Stamenkovic, J.; Gustin, M.S. (2009). Nonstomatal versus Stomatal Uptake of Atmospheric Mercury. *Environ. Sci. Technol.* 43, 1367–1372.

Tengfei Yuan, Peng Zhang, Zhengcheng Song, Shaojian Huang, Xun Wang, Yanxu Zhang (2023). Buffering effect of global vegetation on the air-land exchange of mercury: Insights from a novel terrestrial mercury model based on CESM2-CLM5. *Environment International*. Volume 174, ISSN 0160-4120. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107904>.

Usowicz, B., Lipiec, J., Łukowski, M., & Stomiński, J. (2021). Improvement of Spatial Interpolation of Precipitation Distribution Using Cokriging Incorporating Rain-Gauge and Satellite (SMOS) Soil Moisture Data. *Remote Sensing*, 13(5), 1039. <https://doi.org/10.3390/rs13051039>

Xu, Y., Yuan, W., Zeng, S. et al (2025). Vegetation transition alters mercury pools and highlights dominant atmospheric deposition source in an alpine timberline soil–plant system. *Biogeochemistry* 168, 89. <https://doi.org/10.1007/s10533-025-01264-1>

Xuewu Fu, Xinbin Feng, Wanze Zhu, S. Rothenberg, Heng Yao, Hui Zhang (2010). Elevated atmospheric deposition and dynamics of mercury in a remote upland forest of southwestern China. *Environmental Pollution*. 158 (2010) 2324–2333

Yamamoto, J. K. & Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. Oficina de textos. Edição : 1ª. Número de páginas: 215 páginas

Zhenchuan Niu, Xiaoshan Zhang, Zhangwei Wang, Zhijia Ci, Mercury in leaf litter in typical suburban and urban broadleaf forests in China, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 23, Issue 12, 2011, Pages 2042-2048, ISSN 1001-0742, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60669-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60669-9).

Zhou, J., Obrist, D., Dastoor, A. et al. (2021). Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat Rev Earth Environ* 2, 269–284. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>

Zhou, J.; Obrist, D.; Dastoor, A.; Jiskra, M.; Ryjkov, A. (2021). Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 269–284.

## REGISTROS FOTOGRÁFICOS









